

VŠB-Technická univerzita Ostrava

Fakulta strojní

Katedra obrábění, montáže a strojírenské metrologie

**Měření drsnosti povrchů v závislosti na umístění v
pracovní komoře v procesu SLM**

Measurement of Surface Roughness in Relation to the
Location in the SLM Process Chamber

Student:

Matýsek Radek

Vedoucí bakalářské práce:

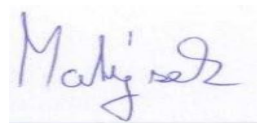
Ing. Jiří Hajnyš, Ph.D.

Ostrava 2020

Místopřísežné prohlášení studenta

Prohlašuji, že jsem celou bakalářskou práci včetně příloh vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a uvedl jsem všechny použité podklady a literaturu.

V Ostravě 18. května 2020

A handwritten signature in blue ink, appearing to read 'Mališ', is written over a horizontal dotted line.

Podpis autora práce

Prohlašuji, že:

- jsem si vědom, že na tuto bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. Zákon o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a země některých zákonů (dále jen Autorský zákon), zejména § 35 – užití díla v rámci občanských a náboženských obřadů nebo v rámci úředních akcí pořádaných orgány veřejné správy, v rámci školních představení a užití díla školního a § 60 – školní dílo,
- беру на вѣдомі, že Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava (dále jen „VŠB-TUO“) má právo nevýdělečné ke své vnitřní potřebě bakalářskou práci užít (§ 35 odst. 3 Autorského zákona),
- bude-li požadováno, jeden výtisk této bakalářské práce bude uložen u vedoucího práce,
- s VŠB-TUO v případě zájmu z její strany, uzavřu licenční smlouvu s oprávněním užít toto dílo v rozsahu § 12 odst. 4 Autorského zákona,
- užít toto své dílo – bakalářskou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem VŠB-TUO, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly VŠB-TUO na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše), беру на вѣдом – že podle zákona č. 111/1998, Sb., o vysokých školách a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů – že tato bakalářská práce bude před obhajobou zveřejněna Ústřední v knihovně VŠB-TUO, a to bez ohledu na výsledek obhajob.

V Ostravě 18. května 2020

.....
Podpis autora práce

Jméno a příjmení autora práce:

Matýsek Radek

Adresa trvalého pobytu autora práce:

Holasovice 23

ANOTACE BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

MATÝSEK, R. Měření drsnosti povrchů v závislosti na umístění v pracovní komoře v procesu SLM. Ostrava: VŠB – Technická univerzita Ostrava, Fakulta strojní, Katedra obrábění, montáže a strojírenské metrologie, 2020, 65s. Vedoucí práce: Ing. Jiří Hajnýš, Ph.D.

Předložená bakalářská práce se zabývá technologií 3D tisku kovů a bere si za cíl zjistit vliv umístění součástí ve stavební komoře v závislosti na drsnosti povrchu dílů. Zkoumané vzorky byly vyrobeny pomocí aditivní technologie selektivního laserového tavení (SLM) z práškového kovu korozivzdorné oceli s označením AISI 316L. V práci jsou popsány aditivní technologie, princip SLM a analýza prací jiných autorů zabývajících se touto problematikou. Na komerčním stroji RENISHAW AM400 bylo vytištěno 5 vzorků umístěných v rozích stavební komory a jeden uprostřed. Vyhodnoceny poté byly všechny čtyři podélné stěny vzorku. Vyhodnocení proběhlo na přístrojích Alicona Focus 5 (optický mikroskop) a Mitutoyo Sj – 210 (dotykový drsnoměr). Měření drsnosti povrchů v závislosti na umístění v pracovní komoře byly zpracovány v experimentu a z výsledků byl vyvozen závěr.

ANOTATION OF BACHELOR THESIS

MATÝSEK, R. Measurement of Surface Roughness in Relation to the Location in the SLM Process Chamber, Department of Machining, Assembly and Engineering Metrology, Faculty of Mechanical Engineering, VŠB-TU Ostrava, pages, 65. Tutor: Ing. Jiří Hajnýš, Ph.D.

The presented bachelor thesis deals with the technology of 3D metal printing and aims to determine the effect of the placement of components in the construction chamber depending on the surface roughness of the parts. The samples were made using additive selective laser melting (SLM) technology from AISI 316L stainless steel powder metal. The work describes additive technologies, the principle of SLM and analysis of works by other authors dealing with this issue. On a commercial RENISHAW AM 400 machine, 5 samples were printed located in the corners of the building chamber and one in the middle. All four longitudinal walls of the sample were then evaluated. The evaluation was performed on Alicona Focus 5 (optical microscope) and Mitutoyo Sj-210 (touch roughness tester) instruments. Measurements of surface roughness depending on the location in the working chamber were processed in the experiment and a conclusion was drawn from the results.

PODĚKOVÁNÍ

Mé poděkování patří především vedoucí bakalářské práce Ing. Jiřímu Hajnyšovi, Ph.D., za odbornou pomoc a rady při zpracování práce. Dále bych chtěl poděkovat rodině za psychickou a finanční podporu při studiu.

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ

Značka	Význam	Jednotka
SLM	Selektivní laserové tavení / Selective laser mealting.	[-]
CAD	Počítačem podporované kreslení / Computer –Aided Design	[-]
3D	Třírozměrná (grafika, zobrazení) / three-Dimension.	[-]
STL	STL je nativní formát souboru stereolitografického programu pro CAD vytvořeného firmou 3D Systems. / (Standard Triangle Language).	[-]
2D	Dvoudimenzionální, dvourozměrný / Two-dimension	[-]
fp	Pěchovací faktor prášku	[-]
LPBF	Laser Powder Bed Fusion - Laserová fúze s práškovou vrstvou	[-]
DoE	Design of Experiment / návrh experimentu	[-]
SEM	Skenovací elektronový mikroskop	[-]
EDS	Rentgenová spektroskopie / Energy Dispersive X-ray Spectroscopy	[-]
lr	Základní délka	[mm]
Zv	Hloubka nejnižší prohlubně	[μm]
Rz	Největší výška profilu	[μm]
Zp	Nejvyššího výstupek profilu	[μm]
Ra	Průměrná aritmetická úchylka posuzovaného profilu	[μm]
Rp	Největší výška výstupku profilu	[μm]
Rv	Největší hloubka prohlubně profilu	[μm]

Sa	Aritmetická výška plochy	[μm]
Sz	Maximální výška posuzované plochy	[μm]
Sp	Největší výška omezené stupnice povrchu	[μm]
Sv	Největší hloubka prohlubně omezené stupnice povrchu	[μm]
ppm	Objemového množství kyslíku	[%]
P	Použitá laserová technologie za jednotku času	[W]
T	Tloušťka vrstvy	[μm]
v	Skenovací rychlost	[$\text{mm}\cdot\text{s}^{-1}$]
h	Šrafovací vzdálenost	[μm]
α	Úhel pootočení	[°]
X ₁ , Y ₁	Skenovací posunutí	[μm]
T	Přehřátí substrátu	[°C]
Ev, E	Hustota vyzařené energie	[$\text{J}\cdot\text{mm}^{-2}$]
d	Průměr	[mm]

Obsah

ÚVOD	1
1 3D TISK	2
1.1 Aplikace 3D tisku.....	2
2 SELEKTIVNÍ LASEROVÉ TAVENÍ	3
2.1 Analýza dat a vytváření produktu	3
2.1 Procesní parametry	5
2.1.1 Výkon laseru (P) a rychlost skenování (v)	6
2.1.2 Skenovací strategie, Skenování	7
2.1.3 Práškové faktory	13
2.1.4 Hodnocení kvality	13
3 Drsnost povrchu při technologii SLM.....	15
3.1 Morfologie povrchu	16
3.2 Kuličkování, rozstřík částic a částečně roztavené kovové částice).....	19
3.3 Vliv povrchu vyrobené SLM na únavové vlastnosti materiálu.....	21
4 Drsnost povrchu	23
4.1 Měření pomocí dotykového profilometru	25
4.2 Optická skenování (Bezdotyková metoda měření)	26
5 Experimentální část	28
5.1 Popis cíle činnosti	28
5.2 Použité stroje a zařízení	29
5.2.1 Alicona InfiniteFocus 5	29
5.2.2 Drsnoměr Mitutoyo Sj-210	30
5.2.3 RENISHAW AM400	31
5.2.4 Prášek pro aditivní výrobu SS 316L-0407	32
5.3 Vyhodnocení vzorku měřených drsnoměrem Mitutoyo Sj-210.....	34
5.3.1 Vyhodnocení parametru (R_a) pomocí drsnoměru	38
5.3.2 Grafy vzorků s parametry (R_z)	39
5.3.3 Vyhodnocení parametru (R_z) pomocí drsnoměru	40
5.4 Vyhodnocení vzorků měřených optickým mikroskopem Alicona InfiniteFocus	
G5 41	
5.4.1 Grafy parametru (R_a)	42
5.4.2 Vyhodnocení parametru (R_a) pomocí Alicony	43

5.4.3	Grafy parametrů (R_z).....	46
5.4.4	Vyhodnocení parametrů (R_z) pomocí Alicony	47
5.4.5	Grafy parametru (S_a).....	48
5.4.6	Vyhodnocení parametrů (S_a) pomocí Alicony.....	49
5.4.7	Grafy parametrů (S_z).....	50
5.4.8	Vyhodnocení parametru (S_z) pomocí Alicony	51
6	Porovnání výsledku měřidel.....	52
6.1	Porovnání naměřených hodnot (R_a).....	52
6.2	Porovnání naměřených hodnot (R_z).....	54
7	Závěr.....	58
	SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY	60

ÚVOD

Stále čím dál tím víc je zájem po tvarově složitých výrobcích ve vysoké kvalitě. Tyto požadavky nutí technické společnosti investovat do vývoje nových technologií. Mezi nové technologie můžeme zahrnout technologii selektivního laserového tavení (SLM), která patří mezi metody 3D tisku práškových kovů. Tato metoda je založena na spékání kovového prášku postupně vrstvu po vrstvě. V mém případě se bude jednat o materiál z nerezové oceli 316 L.

Cílem této bakalářské práce je měření drsnosti povrchu v závislosti na umístění součásti v pracovní komoře v procesu SLM (Selective Laser Melting). Pro experimentální účely bylo vytištěno 5 vzorků o rozměrech 10x10x30 mm, které byly rozmístěny v rozích pracovní komory, a jeden vzorek byl umístěn ve středu této pracovní komory. Vzorky byly vyrobeny na 3D tiskárně Renishaw AM400, parametry tisku byly u všech vzorků stejné. Vzorky byly označeny čísly a jejich strany tečkami pro orientaci uložení v pracovní komoře. Tyto součásti byly měřeny optickým měřicím zařízením Alicona InfiniteFocus 5 a kontaktním drsnoměrem Mitutoyo Sj-210. Hodnoty měření byly vyhodnoceny prvně každá zvlášť. Poté byly hodnoty měřené různými zařízeními porovnávány a vyhodnocovány.

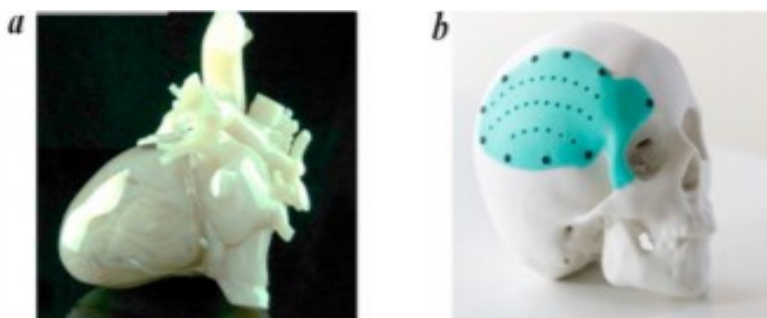
1 3D TISK

Proces 3D tisku neboli aditivní výroba vytváří trojrozměrný pevný objekt z modelu počítačově podporovaného návrhu (CAD), nebo si ho můžeme vytvořit pomocí 3D skeneru, obvykle postupným přidáváním vrstvy materiálu po vrstvě dokud není celý proces dokončen, což je důvod, proč se také nazývá aditivní výroba. Termín „3D tisk“ zahrnuje různé procesy, ve kterých je materiál spojen pod kontrolou počítače za účelem vytvoření trojrozměrného objektu, obvykle vrstvu po vrstvě. Jednou z největších výhod 3D tisku je schopnost vytvářet velmi složité dílce. [1, 2 ,3]

1.1 Aplikace 3D tisku

Technologie 3D tisku se široce používá v různých oblastech, tam, kde užití klasických nástrojů a strojů je časově náročné, materiálově nákladné, nepřesné nebo nemožné. [4] Podle daných oborů, je prokázáno, že technologie 3D tisku a její produkty se běžně používají v každodenním životě. Některé typické příklady jsou uvedeny níže. Například, vysoce kvalitní 3D tištěné repliky kadaverického (např. tkáň, orgány, kosti) materiálu byly vytištěny pro výukové prostředky. [5] Nedávno, několik vědců studovalo použití 3D tisku k produkci kostí, kmenových buněk, krevních cév, tkání, orgánů a zařízení pro dodávání léčiv v lékařské oblasti. [6-8]

Technologie 3D tisku má navíc významný potenciál ve vojenském a obranném sektoru, jako jsou zbraně a části zbraní. [9]. V současné době se 3D tisk také využívá u snímačů, které jsou určeny např. pro sledování zdravotního stavu. Využití najdeme i v potravinářských oblastech. [10-11] Obrázek 1.1 představuje 3D tištěné produkty používané v lékařské oblasti, které vytvářejí model specifický pro pacienta jako lidský implantát (lidskou repliku) orgánu. Technologie 3D tisku by mohla rozšířit svůj přínos z lékařského výzkumu do praktické aplikace.



Obrázek 1.1 - 3D tištěné modely v lékařské oblasti (a) 3D tištěné srdce; b) 3D tisk lebka [12]

2 SELEKTIVNÍ LASEROVÉ TAVENÍ

SLM (Selektivní laserové tavení) je inovativní technologie pro výrobu komplexních tvarů a struktur pomocí kovových prášků. Tento proces spočívá v postupném natavení práškového materiálu vrstvu po vrstvě pomocí vysokovýkonného laserového záření. SLM otevírá příležitosti pro moderní výrobu, protože umožňuje vytvářet kovové výrobky s vysokou přesností a hustotou, optimalizovat design a snižovat hmotnost vyrobených dílů. [12]

Selektivní laserové tavení je jednou z technologií 3D tisku s kovem, který může úspěšně doplňovat klasické výrobní procesy. Umožňuje vyrábět objekty, které mají lepší fyzikální a mechanické vlastnosti než výrobky standardních technologií. S využitím technologie SLM je možné vytvářet jedinečné komplexní produkty bez použití obrábění a drahého vybavení. [12] (viz obrázek 2.1)

Stroje SLM jsou určeny k řešení složitých problémů v letectví, energetice, strojírenství, kovoobrábění, medicíně a špercích. Používají se také ve výzkumných střediscích, projekčních kancelářích a vzdělávacích institucích při provádění výzkumných a experimentálních prací. [12]

Termín „laserové slinování“, který se často používá k popisu SLM, není zcela přesný, protože kovový prášek dodávaný do 3D tiskárny se neslinuje pod laserovým paprskem, ale zcela se roztaví a promění se v homogenní surovinu. [12]



Obrázek 2.1 – Příklady použití selektivního laserového tavení [13]

2.1 Analýza dat a vytváření produktu

Nejprve je digitální 3D model součásti rozdělen do jednotlivých vrstev v ose XY, takže každá vrstva má tloušťku 20 - 100 mikronů je vizualizována ve 2D a v případě potřeby jsou doplněny o potřebné či vhodné podpory. Specializovaný software analyzuje data v souboru STL a porovnává je se specifikacemi 3D tiskárny. Další fází po zpracování obdržených

informací je stavba, která se skládá z velkého počtu cyklů pro každou vrstvu vytvořeného objektu.[12]

Vytváření vrstvy zahrnuje následující operace:

- Kovový prášek se nanáší na stavební desku, která je připevněna ke konstrukční platformě;
- laserový paprsek snímá průřez vrstvy produktu;
- stavební deska se posune o tloušťku vrstvy dolů;
- proces se opakuje. [12]

Stavba se provádí v komoře stroje SLM, který je naplněn inertním plynem (argon nebo dusík), aby byl kovový výrobek chráněn před oxidací. Hlavní objem plynu je spotřebován v počáteční fázi, kdy je veškerý vzduch odstraněn foukáním ze stavební komory. Součást se tiskne na stavěcí desce, která se vyrábí z oceli nebo hliníkové slitiny. Technologie SLM sebou nese samozřejmě také i určité nevýhody v podobě vad ve výrobku. Mezi nejčastější objevující se vady patří tvorba pórů, trhlin, tvorba kuličkových částic a snížení obsahu legujících prvků. Tyto nežádoucí jevy můžeme ovšem minimalizovat vhodným nastavením procesních parametrů. Proces výroby začíná v 3D pracovní komoře, v ose Z se zmenší vrstva naneseného prášku pomocí nanášedce, který současnou vrstvu zarovná na požadovaný rozměr v rozmezí 20-100 μm na předem předeřátou stavěcí desku. Následně dochází k místnímu roztavení prášku a k částečnému natavení podkladové vrstvy skenovacím laserem. Tento proces se opakuje stále dokola do doby, než bude součást kompletně vytvořena. (viz Obrázek 2.2) Na konci tohoto procesu je součást zbavena přebytečného prášku, který se dá recyklovat a poté použít k následující výrobě. Součást je odstraněna od stavěcí desky pomocí pily nebo jiné technologie, podpěry jsou odstraněny a je provedeno konečné zpracování produktu. Mezi konečné zpracování produktu můžeme zařadit dokončovací operace jako je např. broušení, leštění, obrábění atd., za účelem zlepšení povrchu tištěné součásti. Ovšem pozitivem na procesu SLM je schopnost vyrobit danou součást, která se svým tvarem a rozměry podobá konečnému výrobku, což snižuje potřebu dokončovacích operací. Prášek není mechanicky stlačován. Při rozhrnování prášků lze pozorovat typické nanášení Gaussovou jednosložkovou metodou s faktorem f_p v rozmezí 40-60. [14-15]



Obr. 2.2 - Schematické znázornění metody [16]

2.1 Procesní parametry

Proces SLM je složitý proces, který obsahuje mnoho tepelných, mechanických a fyzikálních interakcí. Existuje spousta parametrů, které ovlivňují tato působení. Mezi hlavní parametry laseru patří vlnová délka, výkon, rychlost skenování, vzdálenost šrafů, vzorec skenování, délka vektoru, poměr délky k šířce, úhel skenování, prostorové rozložení paprsku, velikost bodu paprsku, překrývání bodů a nepřetržitý nebo pulzní laserový provoz. Ačkoli většina parametrů má vliv na některé aspekty konečného produktu, v současné době není k dispozici dostatek experimentálních údajů ani výpočtů, které by vztahovaly všechny faktory. Některé parametry nejsou vždy nastavitelné, například vlnová délka. [17] (viz Tabulka 2.1)

Tabulka 2.1 - Přehled relevantních parametrů volených operátorem

Parametr	Značení	Jednotka	Popis
Výkon laseru	P	W	Použitá laserová technologie za jednotku času
Tloušťka vrstvy	T	μm	Tloušťka jedné 2D vrstvy
Skenovací rychlost	v	[m · s ⁻¹]	Rychlost, jakou se pohybuje laserový paprsek po práškovém loži
Šrafovací vzdálenost	h	μm	Vzdálenost mezi dvěma vektory
Úhel pootočení	α	°	Úhel pootočení mezi jednotlivými vrstvami
Skenovací posunutí	X ₁ , Y ₁	μm	Posun skenovací stopy mezi po sobě jdoucími vrstvami ve směru X a Y
Skenovací strategie	-	-	Způsob vyplnění 2D povrchu vektory
Předeřtí substrátu	T	°C	Teplota předeřtí substrátu

2.1.1 Výkon laseru (P) a rychlost skenování (v)

Výkon laseru, rychlost skenování a vzdálenost šraf jsou hlavní nastavitelné parametry pro laserový systém. Výkon laseru a pohyb zaostřeného laserového bodu na povrch prášku by měly být upraveny tak, aby poskytovaly dostatek tepla pro roztavení sil. Šrafovací vzdálenost je vzdálenost mezi dvěma sousedními roztavenými čarami nebo vektory; obvykle je menší než velikost laserového bodu. Šrafovací vzdálenost a velikost místa rozhodují o překrývajícím se procentuálním pokrytí. Tyto tři parametry často spolupracují na přenosu laserové energie do práškového lože. Například, pokud absorpční koeficient není příliš vysoký, může být kompenzován úpravou jednoho nebo všech tří parametrů. Bylo zjištěno[18], že kombinace vysokého výkonu laseru a nízké rychlosti skenování pomáhá redukovat kuličky - tvorba sféroidních kuliček během procesu v důsledku povrchového napětí a nedostatečné natavené předchozí vrstvy [19-20]. Pro běžnou praxi se používá vztah (2.1), kde se určuje hustota vyzářené energie, kde se pro výpočet použije kombinace běžných parametrů:

$$Ev = \frac{P}{v \cdot h \cdot t} \text{ [J/mm}^{-3}\text{]} \quad (2.1)$$

Kde P [W] je velikost výkonu laseru, h [mm] je šrafovací vzdálenost a t [mm] tloušťka vrstvy. Ibrahim [21] ve své publikaci uvádí vztah (2.2), kde vychází z velikosti průměru laserového paprsku.

$$E = \frac{P}{v \cdot d} [J \cdot mm^{-2}] \quad (2.2)$$

kde P [W] je velikost výkonu laseru, v [$mm \cdot s^{-1}$] je skenovací rychlost a d [mm] velikost průměru laserového paprsku.

2.1.2 Skenovací strategie, Skenování

Skenovací vzor může být jednorázový, opakovaný nebo křížový, s konturováním nebo bez kontur. Vzorec skenování by měl být vybrán na základě vlastností materiálu a může ovlivnit drsnost povrchu a mechanické vlastnosti konečného produktu. Ukázalo se například, že opakovaný skenovací vzor snížil kuličkování [18]. Bylo zaznamenáno, že konturování pomáhá generovat stejnou kvalitu pro začátek a konec skenovacích linek [22]. Rovněž kontura tvoří bariéru, která zabraňuje, aby tavenina překročila hranice vzorku [23]. Překrývání dvou paralelních po sobě jdoucích laserových skenerů je definováno jako ve vztahu (2.3).

$$O_v = 1 - (h / \sigma) \quad (2.3)$$

kde h je vzdálenost průlezu a σ je velikost bodu paprsku [24]. Pro $O_v > 0$ dochází k překrývání laserových skvrn a pro $O_v < 0$ žádný kontakt.

Laser pracuje s použitím bodových expozic. Expozice vytvářejí taveninu kovu, která je podobná 3D Gaussově křivce. (viz Obrázek 2.3)



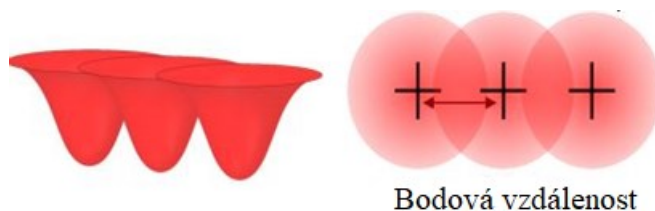
Obrázek 2.3 – Isometrický pohled (Isometric view v levo), půdorysný pohled (Plan view v pravo) [25]

Každý bod má přidělené souřadnice XY společně spolu s pěti předem nastavenými parametry:

- Bodová vzdálenost (mm)
- Expoziční doba (μs)
- Výkon (W)
- Zaostření (μm)
- Šrafovací vzdálenost (μm) [25]

Bodová vzdálenost (Point Distance)

Bodová vzdálenost je vzdálenost mezi středy každé následující tavné lázně. Tyto body by se měly překrývat zhruba o 1/3 své plochy, aby se zabránilo pórovitosti. (viz obrázek 2.4) [25]



Obrázek 2.4 – bodová vzdálenost (point distance) [25]

Expoziční doba (Exposure Time)

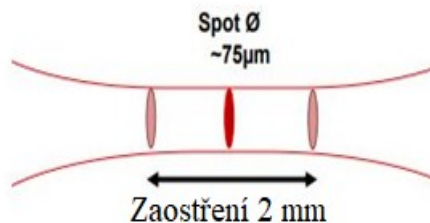
Je to doba, po kterou je laser zapnutý pro každý bod. Je nastavena v mikrosekundách (μs). [25]

Výkon (Power)

Výkon určuje intenzitu laserového paprsku. Nastavuje se ve wattech (W). [25]

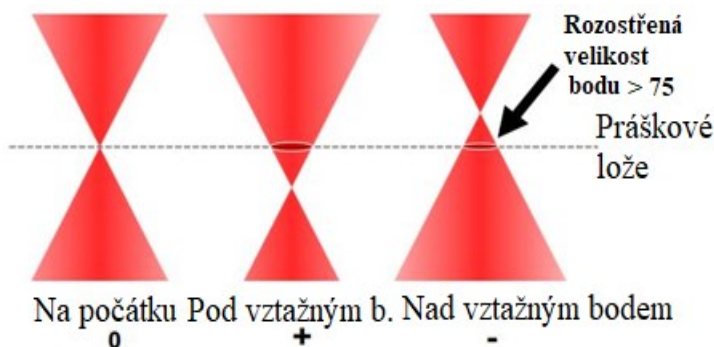
Zaostření (Focus)

Ohnisko laserového paprsku leží na místě, kde se sbíhají rovnoběžné paprsky světla. Ohniskový bod má nejčastěji průměr 75 μm , ale je závislí na parametrech stroje. Může se pohybovat mezi 66 -75 μm . Ohnisko je cca 2 mm dlouhé, což nám udává toleranci $\pm 1\text{mm}$, ve které lze dosáhnout zaostřeného bodu. [25] (viz Obrázek 2.5)



Obrázek 2.5 – Zaostření a průměr bodu (spot) [25]

- Pokud nastavíme tento parametr na $Z = 0$ bude ohnisko umístěno na vztažnou čáru. V tomto případě nám počáteční čára znázorňuje horní část práškového lože.
- Průměr bodu můžeme změnit posunutím paprsku o mm ve směru osy Z.
- Kladné hodnoty posunují ohnisko pod práškové lože a záporné hodnoty přivádějí ohnisko nad práškové lože. [25] (viz Obrázek 2.6)

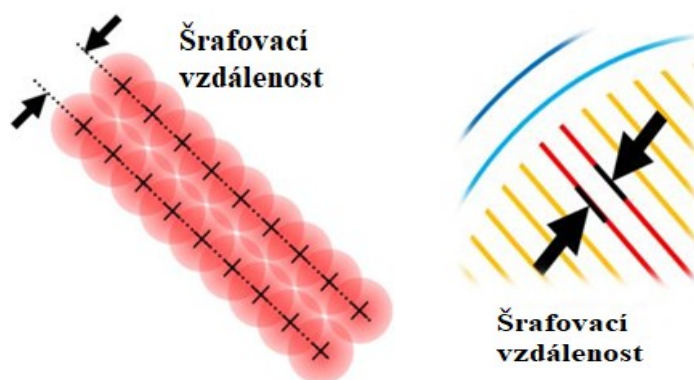


Obrázek 2.6 – nastavení parametru zaostření [25]

Když se ohnisko paprsku přibližuje k práškovému loži, průřez se změní v průměru. Tomuto průřezu se říká spot. Tam se vyskytuje asi 2 mm zaostřeného bodu s nejmenší šířkou paprsku. [25]

Šrafovací vzdálenost (Hatch distance)

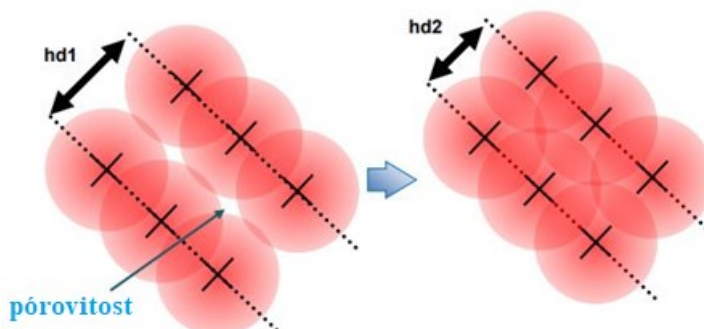
Šrafy se skládají z bodových expozic. Vzdálenost mezi každým přímkovým vektorem bodových expozic se nazývá „Šrafovací vzdálenost“. [25] (viz Obrázek 2.7)



Obrázek 2.7 – šrafovací vzdálenost (Hatch distance) [25]

Šrafovací vzdálenost se nastavuje tak, aby se překrývala po sobě jdoucí tavenina. Pokud by nastala příliš velká vzdálenost mezi šrafy (hd1), mohlo by dojít ke vzniku pórovitosti mezi šrafy.

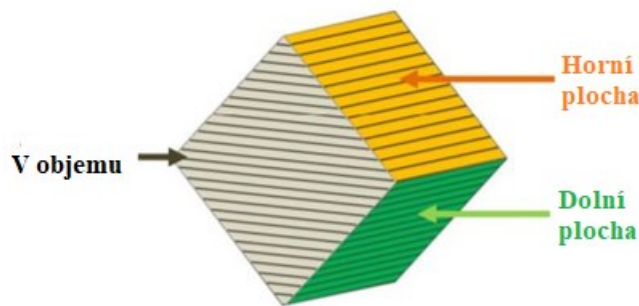
Mezi rovnoběžnými vektory se doporučuje dodržování stejné nebo podobné vzdálenosti jako u vzdálenosti bodů (Point distance). Vzdálenost by měla být přibližně 1/3 (hd2). [25] (viz Obrázek 2.8)



Obrázek 2.8 – doporučené šrafovací vzdálenosti [25]

Oblasti šrafování

Šrafování je proces, ve kterém jsou 2D řezy převedeny na skenovací linie dráhy nástroje. Každá vrstva může mít šrafování rozděleno do 3 hlavních typů: horní plocha (up skin), dolní plocha (down skin), v objemu (volume). [105] (viz Obrázek 2.9)

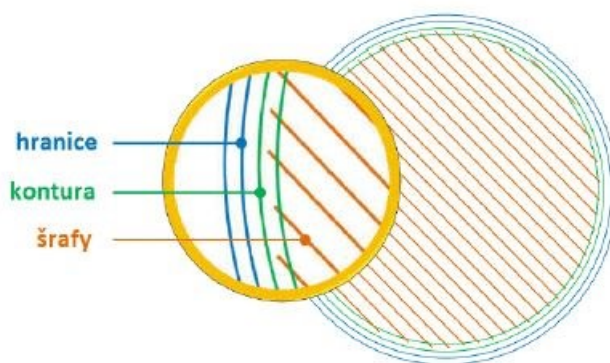


Obrázek 2.9 – Hlavní typy oblasti šrafování [25]

- **Up Skin (horní plocha)** je oblast vrstev, které nejsou pokryty jinou vrstvou.
- **Down Skin (dolní plocha)** je povrchová plocha směřující dolů bez jakéhokoli objemu v předchozí vrstvě.
- **Volume (v objemu)** je jednoduše vnitřní jádro součásti, které není na žádné z hran. [25]

Svazek vektorových dráh v objemu tělesa

Šrafování lze definovat jako proces, ve kterém jsou dvojrozměrné řezy převedeny na skenovací vektory. Stejný princip lze vidět u skenovací strategie, které mají pro vyplnění požadované plochy dopředu před-programované vektorové dráhy. Při procesu SLM se obecně člení do třech vektorových dráh: šrafy, kontura a hranice. Zobrazeno na obrázku 2.10. [25]



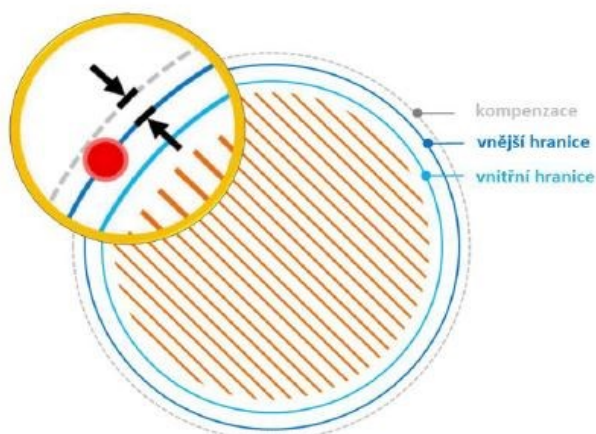
Obrázek 2.10 – základní vektorové dráhy [25]

Hranice šrafování

Hranice skenování vymezují oblasti každé dvojrozměrné vrstvy. Pomáhá zlepšit úpravu povrchu a strukturu, z které se skládá povrch součásti.

Kompensace paprsku se používá k odsazení laseru od krajní vrstvy hranice STL. Podobá se to tradičnímu obrábění, jak by řezný nástroj měl poloměr posunutí od okraje součásti. Obrázek č. znázorňuje velikost bodu na vnějším okraji. Kompensace paprsku se

používá k posunutí paprsku od skutečné hrany řezu, která je na obrázku znázorněna přerušovanou čarou. [25]



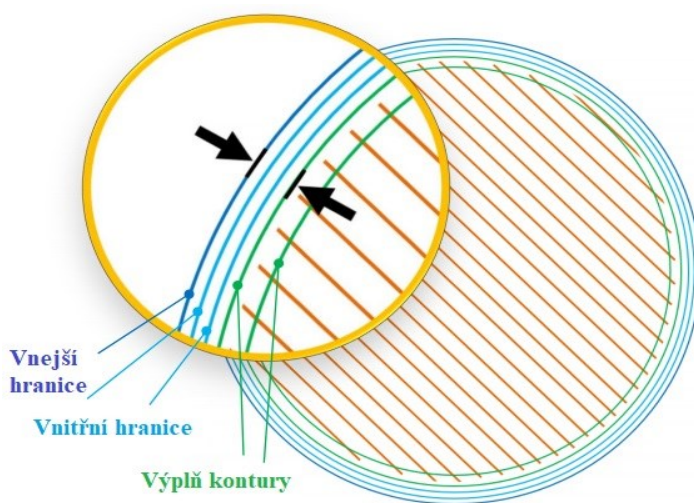
Obrázek 2.11 – znázornění kompenzace [25]

Druhy hranic:

- vnější hranice – Je první a zároveň nejvzdálenější hranice. Musí být uzavřena a nelze ji přesáhnout (přerušit).
- vnitřní hranice – Jsou volitelné, slouží k odsazení výplně dále od okraje součásti. Je dokázáno, že to zlepšuje povrchovou úpravu. [25]

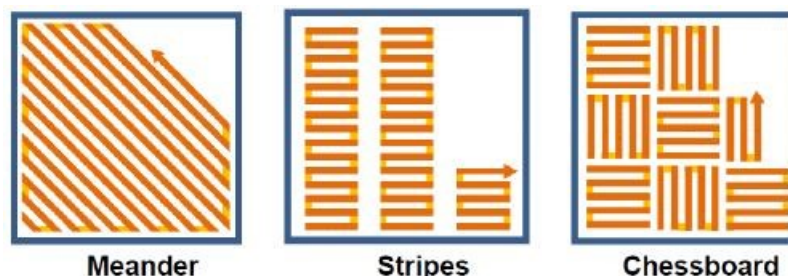
Výplňové kontury

Výplňové kontury jsou podobné hranicím (borders). Účelem této výplně obrysů ke snížení pórovitosti a posílení vazby mezi šrafovací výplní a hranami. [25] (viz Obrázek 2.12)



Obrázek 2.12 - výplň kontury [25]

Vyplnění jednotlivých oblastí se realizuje pomocí různých skenovacích strategií (viz obrázek 2.13). Během procesu SLM různé strategie ovlivňují tepelné vztahy a tímto následně mění hustotu materiálu, tepelné a vnitřní napětí, pórovitost a mikrostrukturu. Díky zbytkovým napětím se nám v součásti můžou vyskytnout deformace, distroze a praskliny. Můžeme pozměnit strategii skenování a tím zmírnit problémy s kvalitou výrobku. [25]



Obrázek 2.13 – Nejvíce používané strategie tisku SLM [25]

2.1.3 Práškové faktory

Kromě laserových faktorů ovlivňují proces LPBF [Laser Powder Bed Fusion (Laserová fúze s práškovou vrstvou)] také vlastnosti prášku. Velikost prášku ovlivňuje účinnost tavení laserem. Velké částice obecně snižují hustotu náplně práškového lože a také vyžadují více energie k roztavení. Na druhé straně menší částice mají tendenci se aglomerovat, což znesnadňuje vrstvení prášku nebo potahování. Typická velikost částic je v rozmezí několika až několika stovek mikronů. Schopnost toku prášku je důležitým faktorem pro rozhodování o distribuci částic na práškovém loži. Dobrý tok prášku je nutný k vytvoření plochého povrchu prášku a jednotné tloušťky práškových vrstev, které jsou nezbytné k dosažení jednotné absorpce laserové energie. Morfologie částic a distribuce velikosti ovlivňují tok prášku, například „Tekutost“ zase významně ovlivňuje účinnost balení, mechanické vlastnosti a drsnost povrchu. Složení prášku, bod tání, optické vlastnosti a vlastnosti přenosu tepla také ovlivňují výběr laserových parametrů a vlastností konečného produktu. Přestože jsou tyto faktory prášku důležité, systematické studie o nich chybí. Tloušťka práškové vrstvy je velmi důležitým faktorem a musí být stanovena podle průniku laserovým paprskem do práškového lože. Tloušťka vrstvy také ovlivňuje hustotu energie, která má být použita, a může ovlivnit drsnost povrchu [26]

2.1.4 Hodnocení kvality

V závislosti na účelu použití se hodnotí atributy finálních produktů, aby se stanovila kvalita dílu. Kritické atributy jsou pórovitost, relativní hustota, drsnost povrchu, rozměrová přesnost, pevnost, mikro tvrdost a další mechanické vlastnosti.

Ve výrobcích zpracovaných LPBF se často tvoří póry. Pórovitost, procento prázdného prostoru v sytkém materiálu, je proto důležitým parametrem pro materiály ošetřené laserem. Obsah pórovitosti lze určit metodou analýzy obrazu [27]. Relativní hustota je

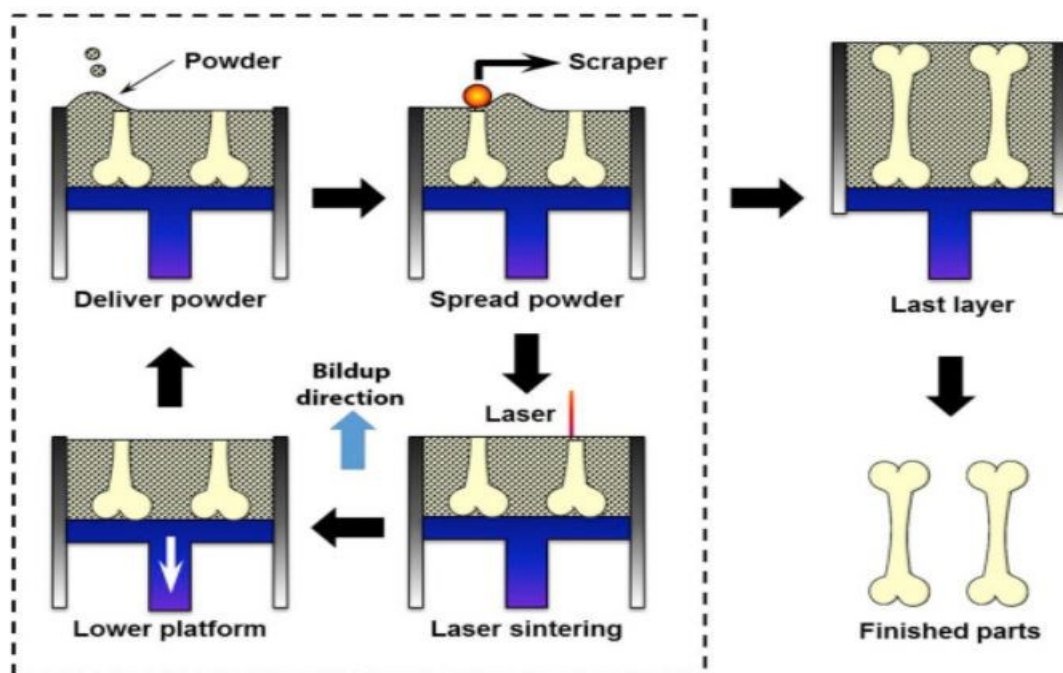
poměr hustoty části zpracované LPBF k teoretické hustotě sypaného materiálu. Relativní hustota je základním parametrem produktu. Kvůli přímému vztahu mezi relativní hustotou a pórovitostí je běžné namísto pórovitosti měřit relativní hustotu, protože relativní hustotu je snadnější měřit. Drsnosti povrchu opatření k nepravidelnosti povrchu, často vyjádřené jako číselné parametry R a RZ, kde R je aritmetický průměr odchylky profilu drsnosti, a RZ je maximální drsnost, nebo také maximální výška profilu od vrcholu do prohlubně.

Rozměrová přesnost je měřítkem přesnosti produktu LPBF vůči očekávaným částem. Pevnost materiálu je míra, která odolává použitému maximálnímu napětí bez porušení, včetně pevnosti v tahu, tlaku a střihu. Důležitým ukazatelem mechanických vlastností produktu LPBF je ohybová pevnost. Byl zaznamenán pozitivní lineární vztah mezi pevností v ohybu a relativní hustotou [28], takže relativní hustota může být indikátorem pevnosti v ohybu. Tvrdost měří schopnost materiálu odolávat trvalé plastické deformaci.

3 Drsnost povrchu při technologii SLM

Nepoužívání optimálních parametrů procesu může způsobit velmi drsný povrch, póry, zbytková napětí, deformace a rozměrové nepřesnosti ve struktuře komponentů, což může výrazně ovlivnit mechanické a funkční vlastnosti produktů SLM.

Pro technologii SLM je prášek z korozivzdorné oceli 316L jedním z nejčastěji používaných materiálů díky své vysoké houževnatosti a vysoké odolnosti vůči korozi [29]. Slitina 316L je austenitická korozivzdorná ocel, která obsahuje železo legované chromem o hmotnostním podílu až 18%, nikl až 14% a molybden až 3%, spolu s dalšími drobnými prvky. Mechanická výkonnost nerezové oceli technologií SLM je však významně ovlivněna její mikrostrukturou, jako je pórovitost a nedostatek fúze [30].



Obrázek 3.1 – průběh procesu SLM

Tabulka 1. byla vytvořena z různých zdrojů. V tabulce jsou použité dva parametry. Výkon (W) a aritmetický průměr (Ra). Všechny součásti, na kterých se zkoumala drsnost povrchu, byly vytištěny metodou SLM z prášku korozivzdorné oceli 316 L.

Tabulka 3.1 - Drsnost povrchu dle různých autorů

Výkon (W)	Drsnost povrchu Ra (μm)	Zdroj
200	7,5	[31]
200	7,9	[31]
200	8,2	[31]
200	5,4	[32]
200	10–16	[33]
200	12,4	[34]
180	10–17,5	[35]
107	14,9	[36]
105	12	[37]
neuvádí	10,4	[38]

3.1 Morfologie povrchu

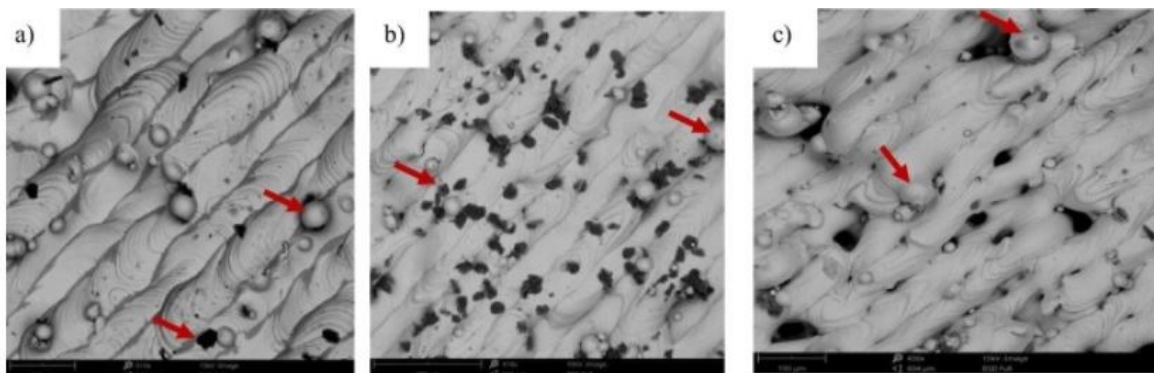
Vzorky použité v této studii [39] byly vyrobeny pomocí stroje Mlab Cusing SLM vyráběného společností Concept Laser. Vzorky s různými vstupními parametry byly vyrobeny podle kombinací Taguchiho metody za účelem porovnání vlivů vstupů zpracování na vlastnosti povrchu. Rozměr zkušebních vzorků byl 10 mm x 10 mm x 10 mm. Materiál použitý v této studii je 316L korozivzdorná ocel. Vzorky byly odříznuty z desky pomocí elektroerozivního obrábění (EDM).

Ve studii byly zkoumány dva faktory, výkon laseru a rychlost skenování. Každý faktor měl tři úrovně, jak je vidět v tabulce 3.2. Hlavním účelem DoE (Design of Experiment, návrh experimentu) je určit klíčové faktory během výrobního procesu a experimentálně definovat účinky těchto faktorů na výsledky. [39]

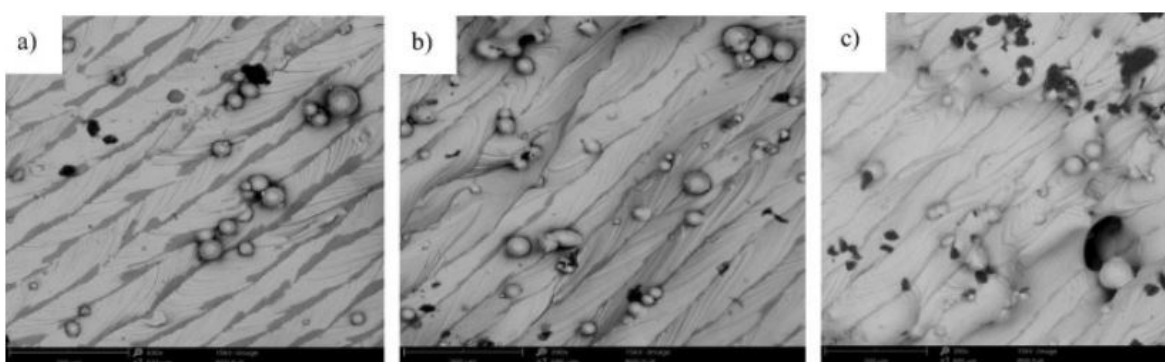
Tabulka 3.2 - Kombinace parametrů dle Taguchiho DoE [39]

Vzorek	Rychlost laseru ($\text{mm} \cdot \text{s}^{-1}$)	Výkon laseru (W)
1	200	50
2	400	50
3	600	50
4	200	75
5	400	75
6	600	75
7	200	100
8	400	100
9	600	100

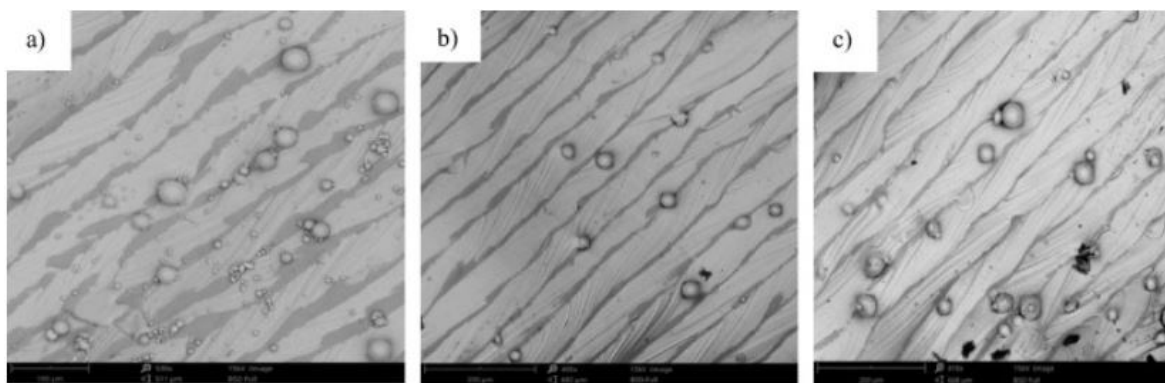
Všechny vzorky byly zkoumány pomocí skenovacího elektronového mikroskopu (SEM), aby se identifikovala jejich morfologie povrchu. (SEM) obrazy vzorků, jak byly vytvořeny, s různými parametry zpracování jsou uvedeny na Obrázcích 3.2, 3.3, 3.4 [39]



Obrázek 3.2 - (a) vzorek SLM 1 ($50 \text{ W} - 200 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$) $510 \times$ zvětšení; (b) vzorek 2 ($50 \text{ W} - 400 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$) $410 \times$ zvětšení; (c) SLM vzorek 3 ($50 \text{ W} - 600 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$) $450 \times$ zvětšení. [39]



Obrázek 3.3 - (a) vzorek 4 ($75 \text{ W} - 200 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$), $430 \times$ zvětšení; (b) vzorek 5 ($75 \text{ W} - 400 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$) $390 \times$ zvětšení; (c) Vzorek 6 ($75 \text{ W} - 600 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$) $390 \times$ zvětšení. [39]

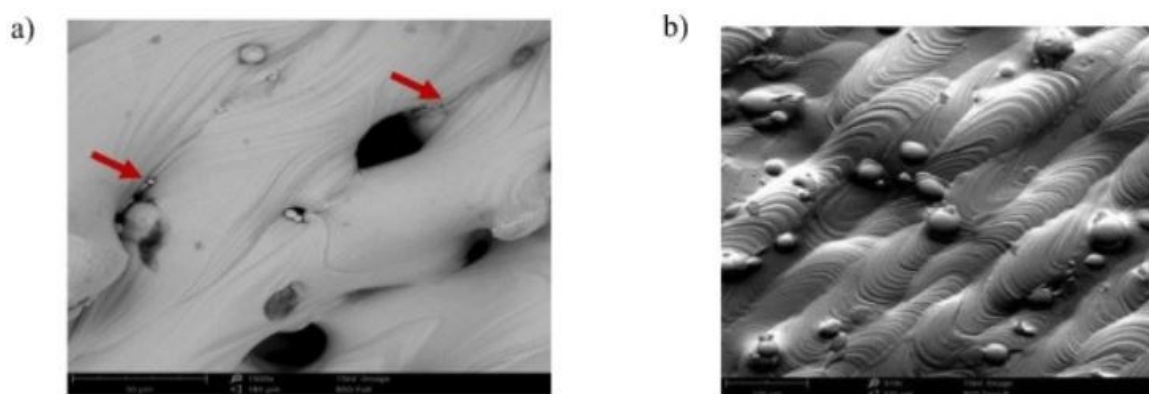


Obrázek 3.4 - (a) vzorek 7 ($100 \text{ W} - 200 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$), $530 \times$ zvětšení; (b) vzorek 8 ($100 \text{ W} - 400 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$) $400 \times$ zvětšení; (c) Vzorek 9 ($100 \text{ W} - 600 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$) $410 \times$ zvětšení. [39]

Stopy po laseru jsou evidentně viditelné a účinky procesních parametrů na povrchovou strukturu jsou také rozpoznatelné. Obrázky 3.2, 3.3, 3.4 ukazují, že různé vzorky s různými vstupními kombinacemi výkonu a rychlosti mají různou taveninu a šířku laserové stopy měnící povrchovou strukturu vzorků. [39]

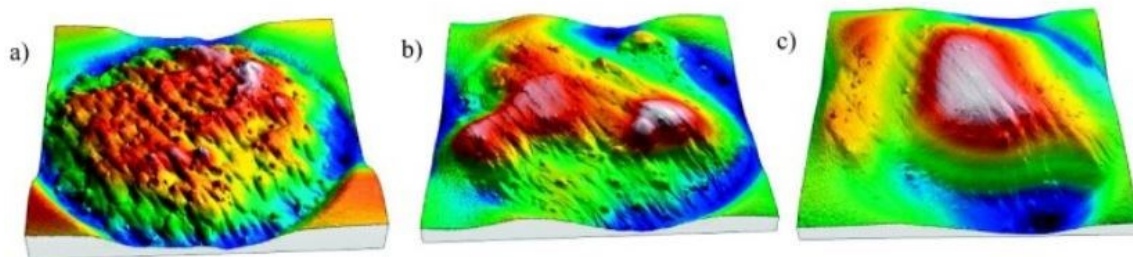
Jak je vidět na Obrázcích 3.2, 3.3, 3.4, vstupní laserové parametry mají významný dopad na povrchové textury vzorků. První vzorek má širší taveninu ve srovnání se vzorky 2 a 3 v důsledku pomalejší laserové rychlosti na povrchu, která umožnila kovovým práškům absorbovat více energie. Avšak s ohledem na vzorek 3 je zde značná nekonzistence mezi sousedními laserovými stopami a taveninovými bazény po liniích na povrchu a má velké otvory a krátery spolu se závažnými kuličkovými efekty. Intenzivní defekty na povrchu a diskontinuita laserových stop byly způsobeny vysokou rychlostí skenování a nízkou kombinací laserového výkonu, což vedlo k nedostatečné hustotě energie. Tavné bazény nejsou vzájemně taveny v určitých oblastech, což vede k velkým otvorům, dutinám a nekonzistenci po celém povrchu.[39]

Iniciace trhliny je vidět v blízkosti otvorů ve vzorku 3, jak je znázorněno na obrázku 3.5. Trhliny mají negativní dopad na únavové vlastnosti dílů. [39]

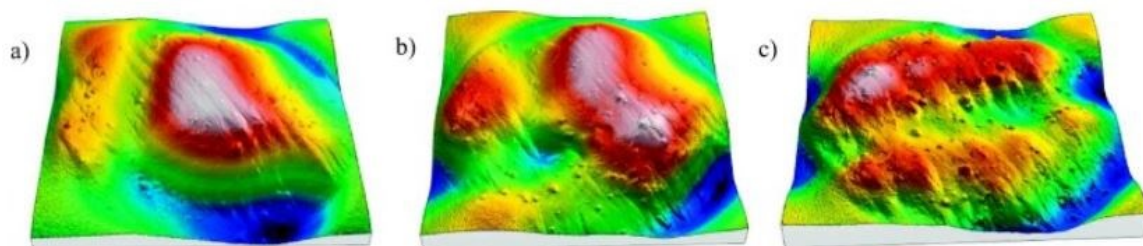


Obrázek 3.5 - (a) vzorek SLM 3 (100 W - 600 mm • s⁻¹) s 1500 × zvětšením; (b) Topografický obrázek SLM vzorku 1 se zvětšením 510 ×. [39]

Obrázek 3.6 ukazuje 3D skenování výsledků (SEM), že vzorek 4 má relativně hladký povrch ve srovnání se vzorkem 1 kvůli zvýšenému výkonu laseru při stejné rychlosti skenování. Podobně vzorek 7 s výkonem laseru 100 W má ještě lepší vlastnosti povrchu ve srovnání se vzorkem 1 a vzorkem 4, kde rychlost laseru zůstává stejná. Obrázek 3.7 ukazuje, že vzorek 9 má drsnější povrch než vzorek 7 a vzorek 8. Lze říci, že kvalita povrchu má nežádoucí vliv na nízkou energetickou hustotu se zvyšující se rychlostí skenování. [39]



Obrázek 3.6 - Porovnání kvality povrchu s ohledem na zvýšení rychlosti laserového výkonu; (a) vzorek SLM 1 (50 W - 200 mm • s⁻¹); (b) vzorek SLM 4 (75 W - 200 mm • s⁻¹); (c) SLM vzorek 7 (100 W - 200 mm • s⁻¹). [39]



Obrázek 3.7 - Porovnání kvality povrchu s ohledem na zvyšující se rychlost skenování; (a) vzorek SLM 7 (100 W - 200 mm • s⁻¹); (b) vzorek SLM 8 (100 W - 400 mm • s⁻¹); (c) SLM vzorek 9 (100 W - 600 mm • s⁻¹). [39]

Na téměř všech vzorcích byly pozorovány efekty kuličkování (balling effects) a rozstřík částic (spattering particles). Některé prášky jsou libovolně rozptýleny po celém povrchu, což způsobuje tvorbu rozstříkujících částic na povrchu. Obecně se během procesu tavení vyskytují dva typy rozptýlu; částice kapiček a rozstřík částic. [40]

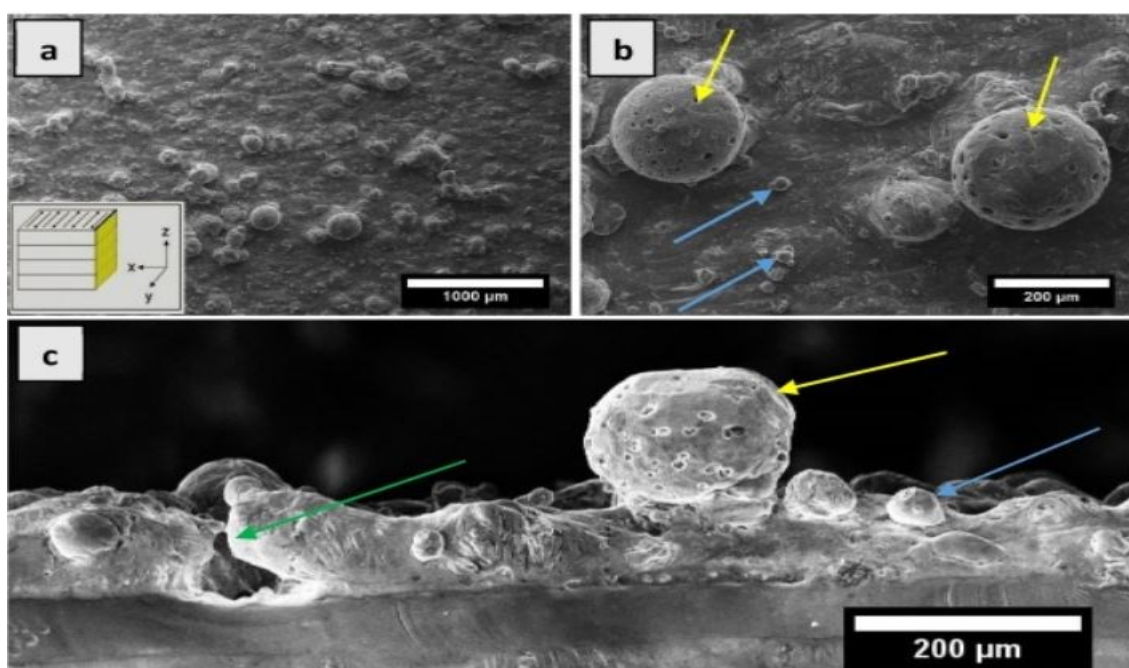
3.2 Kuličkování, rozstřík částic a částečně roztavené kovové částice)

Kuličkování, rozstřík částic a částečně roztavené kovové prášky se vyznačují svojí morfologií, velikostí a mikrostrukturou. Je zjištěno, že tyto rozdíly vyplývají z různých rychlostí chlazení během jejich výroby. Kuličkování (Balling) sdílí stejnou mikrostrukturu se sypkým materiálem. Rozstříky a částečně roztavené prášky vykazují hrubší mikrostrukturu poháněnou tuhnutím, která je ovládána hlavně prouděním a zářením během letu v inertní atmosféře procesní komory.

Ve srovnání s konvenčně obrobenými součástmi však vzorky SLM trpí vysokou drsností povrchu a přítomností zvláštních geometrických prvků na svých površích [41]. Tyto nepravidelnosti jsou založeny hlavně na efektech procesu vytváření vrstvy po vrstvě [42] a během procesu tisku vznikly tři další charakteristické mechanismy kontaminace:

částečně nerozpuštěné kovové prášky, vytváření rozstříku a efekty kuličkování, které lze vidět na Obrázku 3.8 [71]. Studie o takových povrchových defektech také poskytuje informace o genezi hromadných defektů v důsledku povahy laserových skenerů, protože prodlužují skutečnou hranici přetaveného objemu, interagují s těmito (povrchovými) nedokonalostmi a případně způsobují hromadné defekty [43].

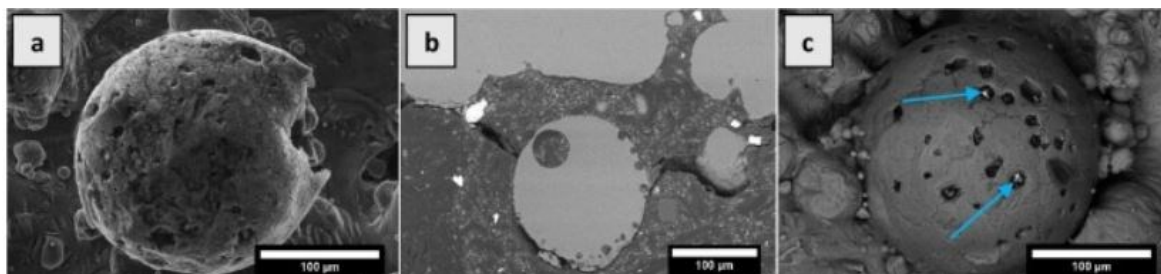
I po intenzivní optimalizaci procesu je často zjištěno, že povrchy součástí jsou vždy ovlivněny některými z výše popsanych geometrických prvků. Druhým faktorem, který je vždy pozorován, je účinek oxidů, které se nevyhnutelně vytvářejí během SLM, bez ohledu na tlak O_2 a množství ochranného plynu uvnitř stavební komory. Vysoké teploty v tavenině mohou způsobit kondenzaci oxidových pár na povrchu kapaliny [44]. U méně reaktivních kovů jsou tyto oxidové vrstvy v rozsahu nanometrů a mohou být narušeny nebo odpařeny, což má zanedbatelný účinek na kvalitu dílu.



Obrázek 3.8 - Obecná morfologie bočních povrchů tištěného vzorku (na obrázku 3.8 b a c představují žluté šipky rozstříky, zelená šipka představuje kuličky a modré šipky odpovídají částečně roztavenému kovovému prášku) [45]

Rozstříky a částice roztaveného prášku se zde rozlišují na základě rozdílu v jejich velikosti, protože rozstříky obvykle mají velikost kolem 200 µm, zatímco částice roztaveného prášku mají stejnou velikost výchozího neroztaveného prášku (tj. V rozmezí 20–50 µm). Rozstříky jsou také identifikovány jejich porézním povrchem, jak odhalily obrázky s větším přiblížením. Obrázek 3.9 znázorňuje povrch s krátery rozstříků, které mají být výsledkem kontinuálního odpařování materiálu ve fázi tavení, často podporované rozsáhlým přehřátím. Kapsy par blíže k povrchu mají tendenci vybuchovat a vytvářet zvláštní krátery; Obr. a a b představují příklady těchto dutin po jejich prasknutí a před jejich

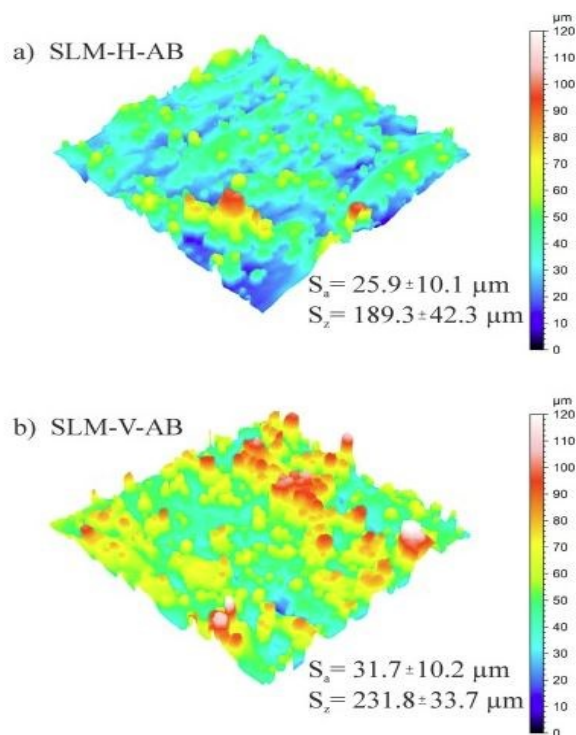
prasknutím. Přehřátí tekutého kovu způsobuje difúzi a segregaci těkavých prvků, jako je Mg a Mn, v blízkosti povrchu. EDS (Energy Dispersive X-ray Spectroscopy) analýzy zdůraznily přítomnost intermetalických částic v kořenech některých pórů (ukázáno na místech se šipkami znázorněnými na obrázku 3.9 c), což naznačuje, že intermetalika se mohla vytvořit segregací během tuhnutí. [46-47]



Obrázek 3.9 - Příklady vytvořených rozstříků na povrchu a) SEM obraz po výbuchu z parní kapsy; (b) SEM obrázek rozstříkovaného rozstříku s důkazy o vnitřních plynových kapsách před výbuchem; (c) SEM obraz rozstříku v zpětně rozptýleném režimu. [45]

3.3 Vliv povrchu vyrobené SLM na únavové vlastnosti materiálu

Výsledky uvedené ve studii pána Bastiana Blinna ukazují u materiálu AISI 316L selektivně laserově tavené (SLM) významné snížení únavové pevnosti v důsledku nízké kvality aditivně vyráběného povrchu. Proto byla pomocí konfokální mikroskopie zkoumána drsnost povrchu vzorků po tisku v horizontálním a vertikálním směru (SLM-H-AB a SLM-V-AB). Jak je znázorněno na obrázku 3.10, vzorky vykazují podle očekávání relativně vysokou drsnost povrchu. Kromě toho, ve svislém stavebním směru vede k vyšším hodnotám S a Sz ve srovnání s horizontálním směrem stavěním. V důsledku toho lze u vertikálně postavených vzorků očekávat výraznější snížení únavové pevnosti. [48]



Obrázek 3.10 - Povrchová topografie, jakož i hodnoty drsnosti S_x a S_z (a) SLM-H-AB a (b), SLM-V-AB vzorků získaných konfokální mikroskopií. [48]

4 Drsnost povrchu

Drsnost povrchu, také známa jako topologie povrchu, je nerovnost povrchu, která vzniká při výrobě součástí. Měří se v podélném a příčném směru. Drsnost povrchu nám ovlivňuje technologie a technologické podmínky ve výrobě. Norma ČSN EN ISO 4287 byla zavedena v roce 1998. Z normy jsou vybrány následující parametry a definované níže v textu. [49-50]

a) Největší výška profilu (R_z)

Součet výšky Z_p nejvyššího výstupku profilu a hloubky Z_v nejnižší prohlubně profilu v rozsahu základní délky l_r . (viz 4.3) [51-52]

b) Střední aritmetická úchylka profilu (R_a)

Aritmetický průměr absolutních hodnot $Z(x)$ v rozsahu základní délky l_r . (viz 4.4) [53]

$$R_a = \frac{1}{l_r} \int_0^{l_r} |Z(x)| dx \quad (4.1)$$

c) Aritmetická průměrná výška (S_a)

S_a je rozšíření R_a (aritmetická průměrná výška čáry) na povrch. Jako absolutní hodnota vyjadřuje rozdíl ve výšce každého bodu ve srovnání s aritmetickým průměrem povrchu. Tento parametr se obvykle používá k vyhodnocení drsnosti povrchu. [54]

$$S_a = \frac{1}{A} \iint_A |z(x, y)| dx dy \quad (4.2)$$

d) Maximální výška vybrané oblasti (S_z)

S_z je definován jako součet největší hodnoty výšky výstupku a největší hodnoty hloubky výstupku v definované oblasti. [54]

$$S_z = S_p + S_v \quad (4.3)$$

e) Maximální výška výstupku (S_p)

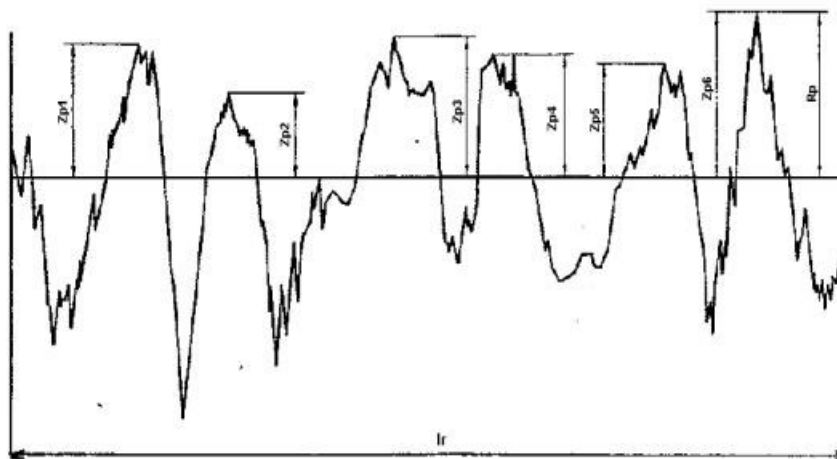
S_p je výška nejvyššího píku v definované oblasti. [54]

$$S_p = \max z(x, y) \quad (4.4)$$

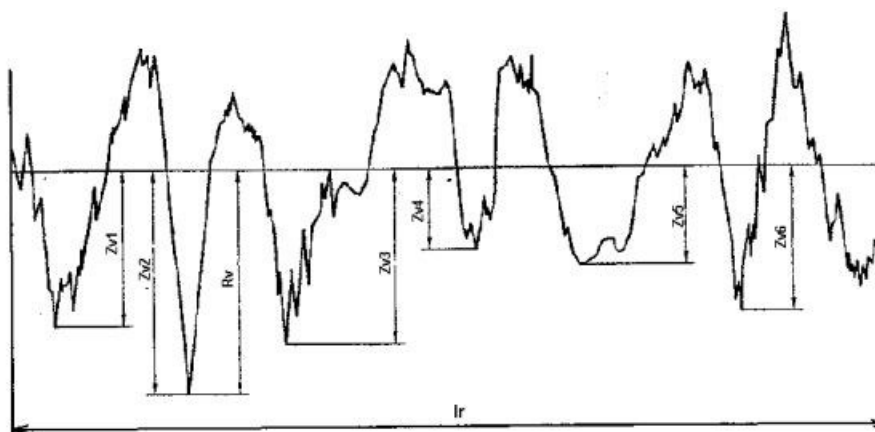
f) Maximální výška hloubky (S_v)

S_v je absolutní hodnota výšky největší hloubky v definované oblasti. [54]

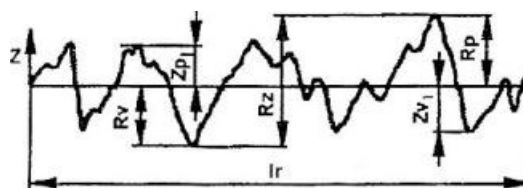
$$S_v = |\min z(x, y)| \quad (4.5)$$



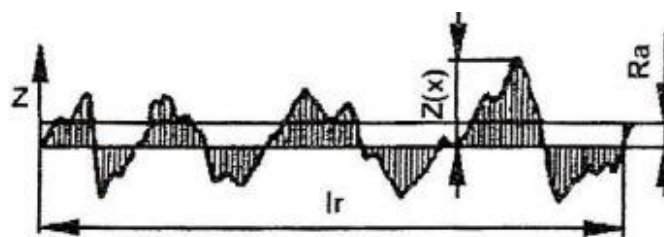
Obrázek 4.1 - Největší výška výstupku profilu (Z_p) [55]



Obrázek 4.2 - Největší hloubka prohlubní profilu (Z_v) [55]



Obrázek 4.3 - Parametry drsnosti (R_v , R_p , R_z) [56]



Obrázek 4.4 - Parametr drsnosti R_a [57]

4.1 Měření pomocí dotykového profilometru

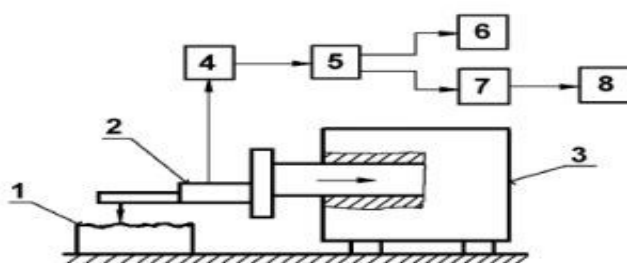
Dotyková metoda snímá drsnost povrchu, je to elektrické měřicí zařízení. Používají se v průmyslové výrobě a jsou vybaveny analogovými zesilovači měřených hodnot nebo mikropočítači. Ze snímaného profilu dokážou okamžitě vyhodnotit námi požadované drsnosti povrchu. Výrobek je zkoumán plošně ve 2D řezu profilu, který má být kolmý na směr stopy nástroje. [58]

Pro snímání se užívá diamantový hrot s úhlem 90° a 60° . Vertikální vychýlení snímače se převádí v elektromagnetickém měniči na elektrické signály a přivádí se do vyhodnocovaného zařízení. [58]

Mechanické metody např. dotykový profilometr (Obrázek 4.5) mají některé své výhody a nevýhody (Tabulka 4.1).

Tabulka 4.1 - Výhody a nevýhody mechanických metod [59]

Nevýhody dotykových měřidel	Výhody dotykových měřidel
destrukce povrchu u měkkých materiálů	měří strojírenské povrchy
pouze 2D měření	velká rozlišovací schopnost
pomalý pohyb hrotu po zkoušeném povrchu	přímé měření parametrů topografie povrchu
nemožnost dálkového řízení	překoná zbytky materiálu a olejový film



Obrázek 4.5 - Dotykový profilometr [60]

- 1 – Měřená součást
- 2 – Snímací hlavice s hrotem.
- 3 – Posunový mechanismus.
- 4 – Zesilovač.
- 5 – Filtr.
- 6 – Registrační jednotka.
- 7 – Jednotka, která zpracovává signál.
- 8 – Zobrazovací jednotka.

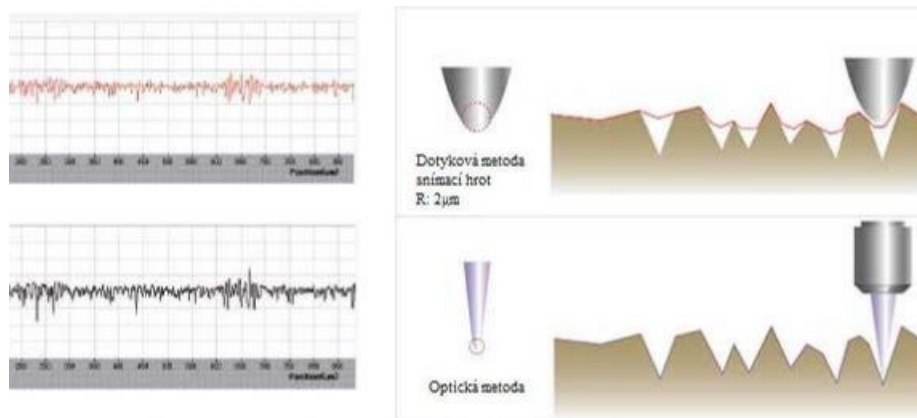
Tabulka 4.2- Faktory ovlivňující měření [60]

Správnost výsledků měření ovlivňují tyto faktory
poloměr zaoblení snímacího hrotu (2, 5 a 10 μ m)
měřicí (přítlačná) síla (0,00075N)
vrcholový úhel snímacího hrotu (90°, 60°)
rychlost změny měřicí síly
celkové geometrické uspořádání systému snímače

4.2 Optická skenování (Bezdotyková metoda měření)

Metody optického měření jsou založeny na použití optických metod a zařízení pro extrahování informací o měření o studovaném objektu nebo, jak se říká, o použití optického signálu pro kódování informací o měření. V měřicím mikroskopu tedy informace o geometrických souřadnicích měřeného objektu obsahuje rozložení osvětlení v jeho optickém obrazu; interferometr umožňuje posuzovat malé deformace leštěného povrchu změnami ve tvaru (fázové struktuře) zkoumaného vlnoplochy optického záření, které jsou zařízením převedeny na změny v konfiguraci interferenčních proužků, které také závisí na rozložení osvětlení v interferenčním vzoru, což odráží deformace zkoumaného vlnoplochy. [61]

Výhodou bezdotykových přístrojů je skutečnost, že měřicí zařízení nepřichází do styku s měřeným vzorkem a tím nedojde k jeho poškození. Mezi další výhody patří, že není potřeba korekce měřicího hrotu a také možnost měření větších ploch. Nevýhodou bezkontaktních měřicích přístrojů je fakt, že může dojít k tzv. ztrátě dat (např. náhlou změnou profilu nebo v hraničních oblastech). Ztráta dat je způsobena tím, že se paprsek neodrazí správně zpět do detektoru a ten nenaznamená žádná data. Ke ztrátě dat může dojít i při měření ploch s nízkou odrazivostí. Naopak technologie bezdotykového měření drsnosti povrchu může měřit jemné nepravidelnosti, které konvenční měřicí přístroje nejsou schopny detekovat. Optické mikroskopy pro měření drsnosti jsou obvykle vybaveny vysokou citlivostí pro měření složitých a strmějších nepravidelností. [62]



Obrázek 4.6 - Srovnání měření drsnosti pomocí dotykového pera (horní) a optické metody (spodní) [63]

5 Experimentální část

5.1 Popis cíle činnosti

Úkolem praktické části bakalářské práce bylo vytisknout 5 vzorků o rozměrech 10x10x30 mm na stroji Renishaw AM400. Všechny vzorky byly tištěny ze stejného materiálu korozivzdorné oceli 316 L a za stejných parametrů, které jsou uvedené v tabulce 5.1. Po vytištění byly vzorky očíslovány a označeny tečkami (viz obrázek 5.1). Ke kontrole byla použita bezdotyková metoda měření na optickém mikroskopu s objektivem 20x Alicona InfiniteFocus 5 a kontaktním drsnoměrem Mitutoyo Sj-210. Hodnoty naměřených výsledků byly zpracovány a uvedeny v závěru.

Tabulka 5.1 – Tiskové parametry vzorku

Výkon Laseru	$P = 200 \text{ W}$
Skenování	$V_{\text{scan}} = 650 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$
Strategie	Meander
Výška vrstvy	$T_{\text{layer}} = 50 \text{ } \mu\text{m}$



Obrázek 5.1 – rozložení vzorků v pracovní komoře a označení měřených ploch

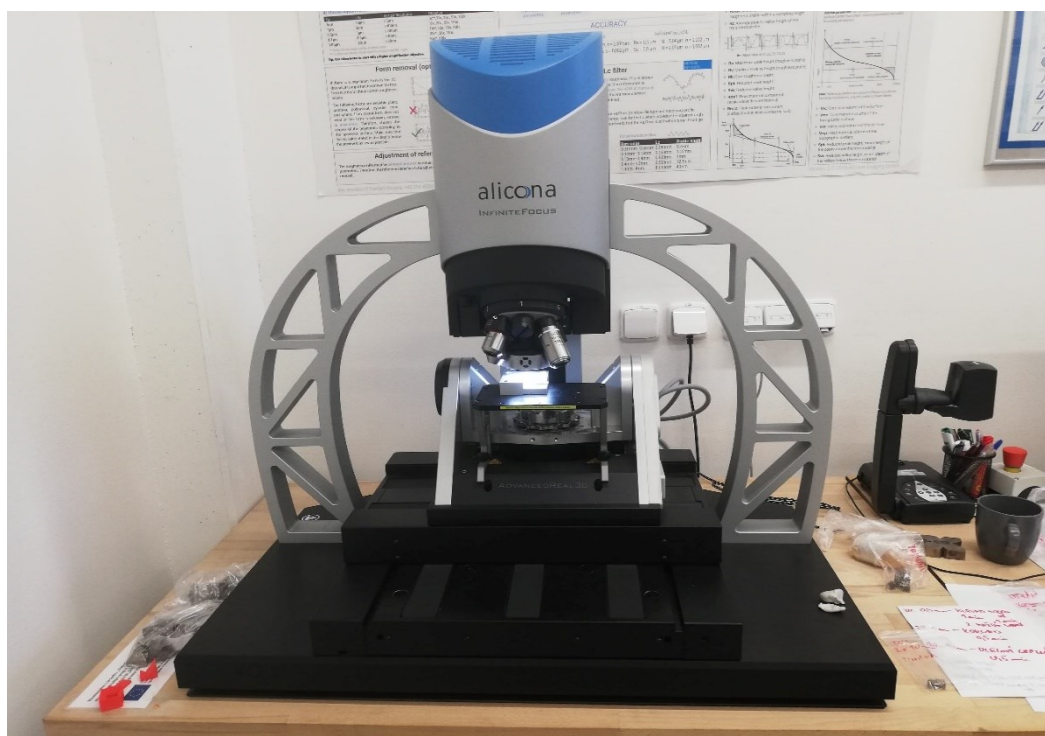
5.2 Použité stroje a zařízení

5.2.1 Alicona InfiniteFocus 5

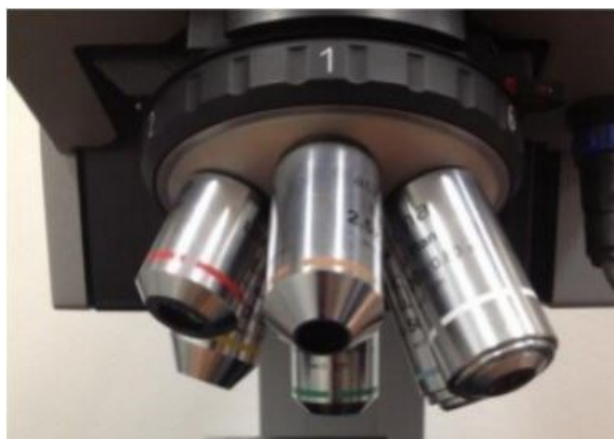
Hodnoty pro posuzování kvality povrchu byly získány měřením pomocí optického třídimenzionálního mikroskopu Alicona InfiniteFocus, který využívá optickou metodu měření. Jedná se tedy o bezdotykové měření, a to pro rozsah mikro a nanometrů.

InfiniteFocus je vysoce přesný, rychlý a flexibilní optický 3D měřicí systém. Pouze s jedním senzorem uživatelé ověřují rozměrovou přesnost a měří drsnost povrchu svých součástí. Na základě technologie Focus Variation je rozsah měřitelných povrchů téměř neomezený. Komponenty jsou sledovatelné s vysokou přesností, s vysokým svislým rozlišením a vysokou opakovatelností. Robustní princip měření Focus-Variation v kombinaci s hardwarem izolujícím vibrace umožňuje měření tvaru a drsnosti i velkých a těžkých součástí. Všechny osy InfiniteFocus jsou vybaveny vysoce přesnými kodéry zajišťujícími přesný pohyb stolku. [64]

Přístroj Alicona InfiniteFocus pracuje s počítačem (kompatibilní se systémem Windows) přes software IF-Laboratory Measurement, který je dodáván přímo výrobcem. Software je uživatelsky velmi dobře zpracován a nabízí velkou řadu měřících parametrů drsnosti, které vyhodnocuje v přehledných grafech a tabulkách. [64]



Obrázek 5.2 – Měřicí přístroj Alicona InfiniteFocus G5



Obrázek 5.3 – Hlava měřicího přístroje s objektivy [65]

5.2.2 Drsnoměr Mitutoyo Sj-210

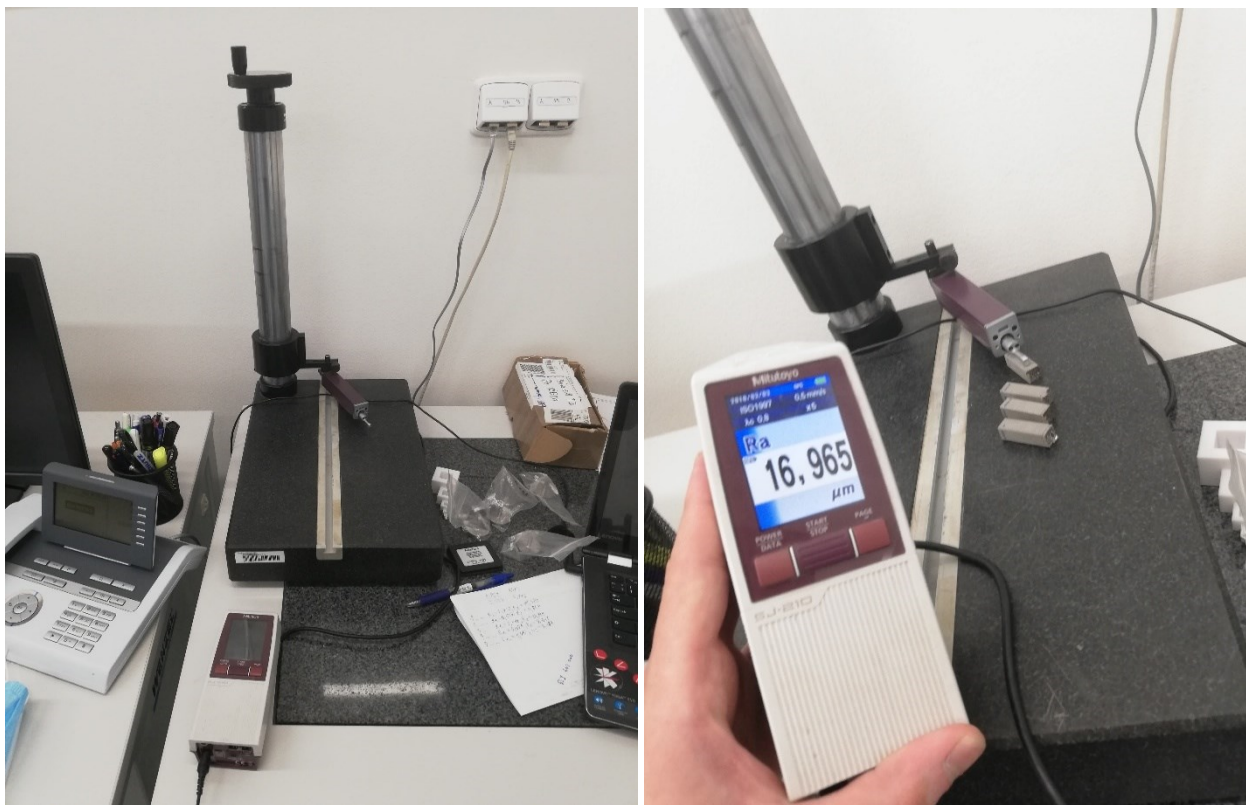
Jedná se o přenosný systém s opěrnou patkou k určení drsnosti povrchu pro nasazení ve výrobním prostředí. Odnímatelný posuv umožňuje nejen použití jako kompaktní systém (integrováný posuv) flexibilně použitelný k měření na těžko přístupných místech, ale také aplikace na měřicím stojánku. [66] (viz Obrázek 5.4)

Základní vlastnosti

- jednoduché intuitivní navigační menu
- jednotlivé nebo skupinové zobrazení výsledků měření
- zobrazení vypočteného profilu a BAC/ADC grafu
- vyhodnocení tolerance
- ukládání dat a podmínek na paměťovou kartu Micro-SD
- barevný displej TFT 2,4“ s vyšším grafickým rozlišením
- elektronický otočný displej
- rozhraní USB, RS232, SPC a možnost připojení nožního spínače
- integrováný posuv, použitelný odděleně
- zadávání přístupových práv (ochrana heslem)
- 10 vyvolatelných podmínek měření
- geometrie snímacího hrotu dle DIN EN ISO 3274: 2μm/60°
- akumulátor (Ni-MH), doba nabíjení 4 hodiny, stačí pro cca 1000 měření [66]

Posuvová jednotka

Posuvová jednotka může být oddělena od zobrazovací jednotky pomocí kabelu, což umožňuje flexibilnější měření. Jednotka může být oddělena a znovu připojena v jednom jednoduchém kroku. Existuje mnoho různých druhů jednotek a detektorů. [66]



Obrázek 5.4 – Drsnoměr Mitutoyo Sj-210

5.2.3 RENISHAW AM400

Model součásti z CAD aplikace je třeba nejprve virtuálně rozřezat na jednotlivé vrstvy. Posuvná lamela rozprostře na pracovní desce stroje tenkou vrstvu kovového prášku o tloušťce 20 až 100 mikronů. Energie laserového paprsku 2D řez lokálně nataví a kovový prášek se spojí do pevné a homogenní 2D struktury. Následuje nová vrstva prášku a natavení další vrstvy, která se spojí s vrstvami předchozími. Celá operace se opakuje tak dlouho, dokud není vystavěn celý požadovaný 3D díl. [67]

Tavení práškového kovu probíhá v ochranné atmosféře. Kvalita materiálu výsledného dílce těsně souvisí s obsahem kyslíku v pracovním prostoru stroje. Pro dosažení homogenní struktury je třeba eliminovat kyslík z pracovní komory. Stroj AM400 (viz Obrázek 5.5) nejprve vyčerpá vzduch z pracovního prostoru a do vzniklého vakua doplní ochranný plyn argon. Čistota pracovní atmosféry je udržována na úrovni 0,1 % objemového

množství kyslíku (1000 ppm) a pro zpracování titanu dokonce na úrovni 0,01 % (100 ppm). Díky tomu se dosahuje vysoce homogenní struktury výsledného dílu bez porozity. [67]



Obrázek 5.5 – 3D tiskárna RENISHAW AM400 [68]

Tabulka 5.2 – Technická data tiskárny [69]

Maximální pracovní prostor	250 x 250 x 300 mm
Rychlost stavby	5 cm ³ – 20 cm ³ (/h)
Tloušťka vrstvy	20 -100 μm
Průměr stopy laseru	70 μm
Výkon laseru	400 W
Napájení	230 V 1PH 16 A

5.2.4 Prášek pro aditivní výrobu SS 316L-0407

Slitina 316L-0407 je austenitická nerezová ocel, která obsahuje železo legované chromem o hmotnostní frakci až 18%, nikl až 14% a molybden až 3%, spolu s dalšími drobnými prvky. Slitina je mimořádně nízkou variantou uhlíku u standardní slitiny 316L [70]

Díky nízkému obsahu uhlíku je 316L-0407 odolný vůči senzibilizaci (srážení karbidů na hranicích zrn) a vykazuje dobré svařovací vlastnosti. Má také nízké napětí na porušení a pevnost v tahu při vysokých teplotách.[70]

Aplikace

- Formy na vstřikování plastů a tlakové lití do formy, vytlačovací formy
- Chirurgické nástroje
- Příbory a kuchyňské nádobí
- Námořní komponenty
- Vřetena a šroub
- Obecné inženýrství [70]

Vlastnosti materiálu

- Vysoká tvrdost a houževnatost
- Vysoká odolnost proti korozi
- Vysoká schopnost stroje
- Lze vysoce leštit [70]

Tabulka 5.3 - Obecná data (Generic data - wrought materiál) [70]

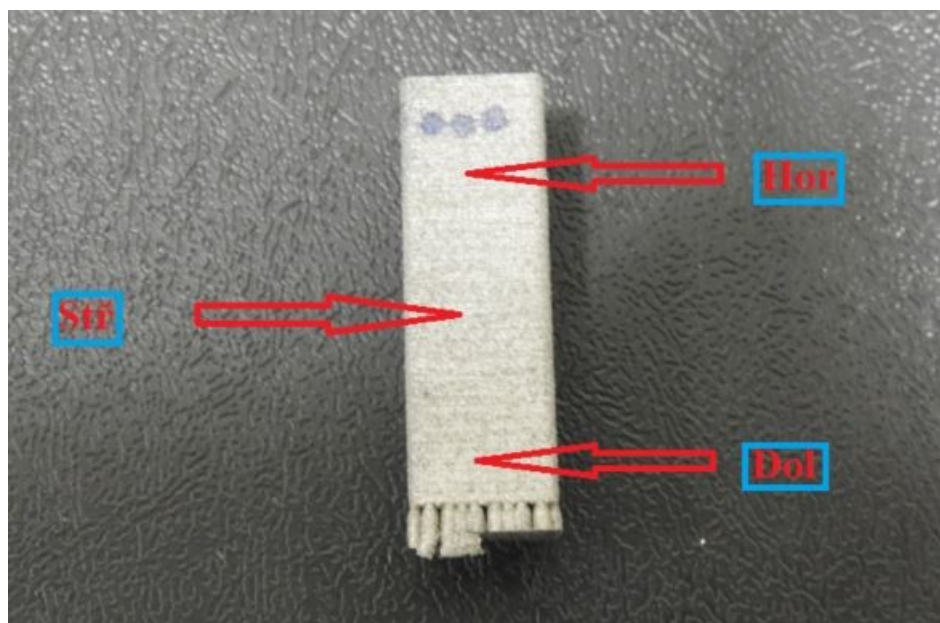
Hustota	7.99 g/cm ³
Tepelná vodivost	16.2 W/mK
Rozsah tání	1371 až 1399 ° C
Součinitel tepelné roztažnosti	16•10 ⁻⁶ K ⁻¹

Tabulka 5.4 – Složení prášku [70]

Prvek	Hmotnost (%)
Železo	zůstatek
Chrom	16 až 18
Nikl	10 až 14
Molybden	2 až 3
Mangan	≤ 2
Křemík	≤ 1
Dusík	$\leq 0,1$
Kyslík	$\leq 0,1$
Fosfor	$\leq 0,045$
Uhlík	$\leq 0,03$
Síra	$\leq 0,03$

5.3 Vyhodnocení vzorku měřených drsnoměrem Mitutoyo Sj-210

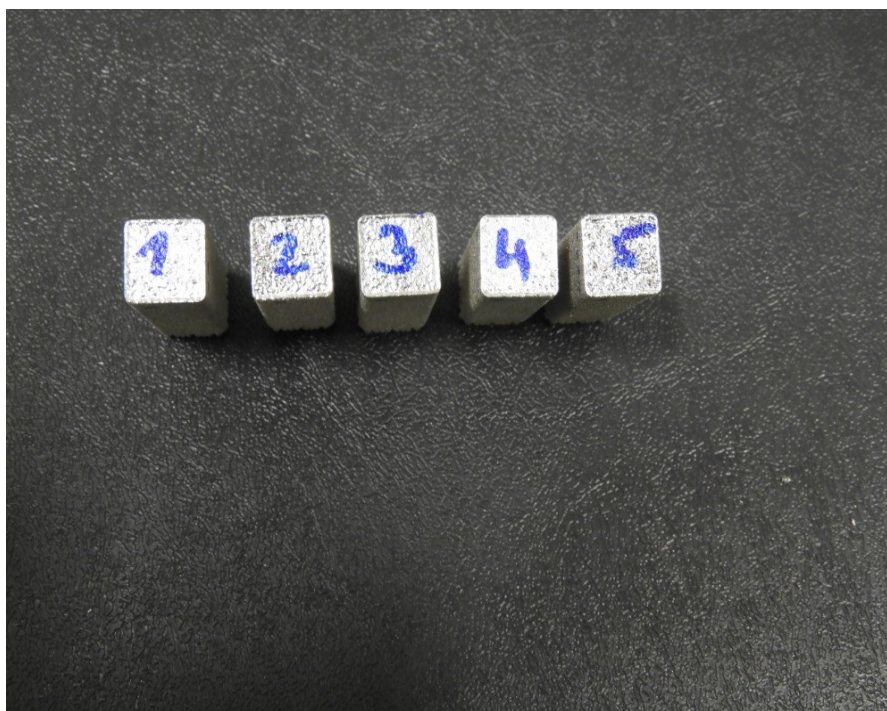
Po vytištění a označení vzorků (viz Obrázek 5.7, 5.8) o velikosti 10x10x30 mm probíhalo měření jednotlivých ploch pomocí drsnoměru ve třech místech (viz obrázek 5.6). Na každé ploše byly vyhodnoceny parametry střední aritmetické úchylky profilu (***Ra***) a největší výška profilu (***Rz***). Následně byly hodnoty zpracovány v programu microsoft excel 2016 a poté vyhodnoceny. Naměřené hodnoty jsou zpracovány v tabulkách. (viz. příloha 1)



Obrázek 5.6 – Značení měřených hodnot v tabulkách (měření všech kusů probíhalo uprostřed kusu)



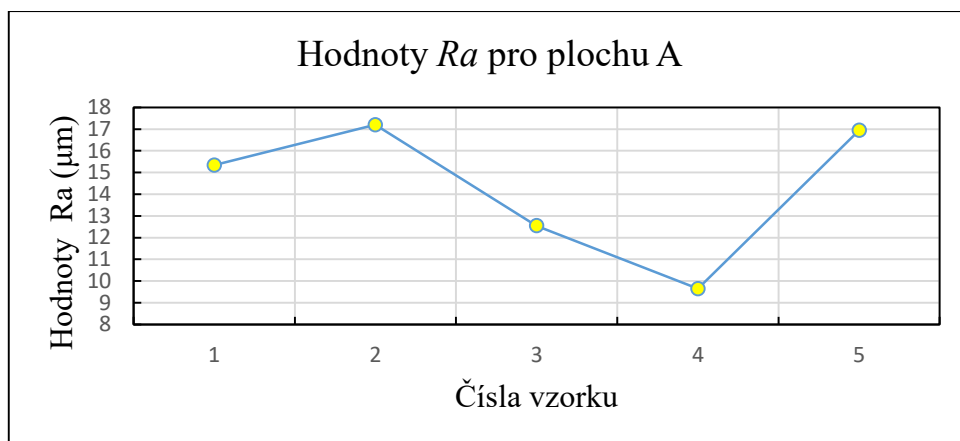
Obrázek 5.7 – Tečky označují jednotlivé strany umístění v pracovní komoře



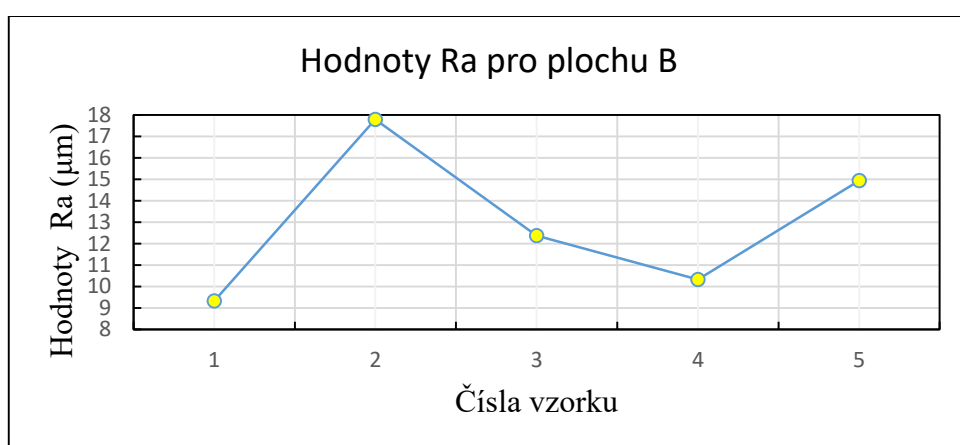
Obrázek 5.8 – Číslice označují umístění tisku v pracovní komoře



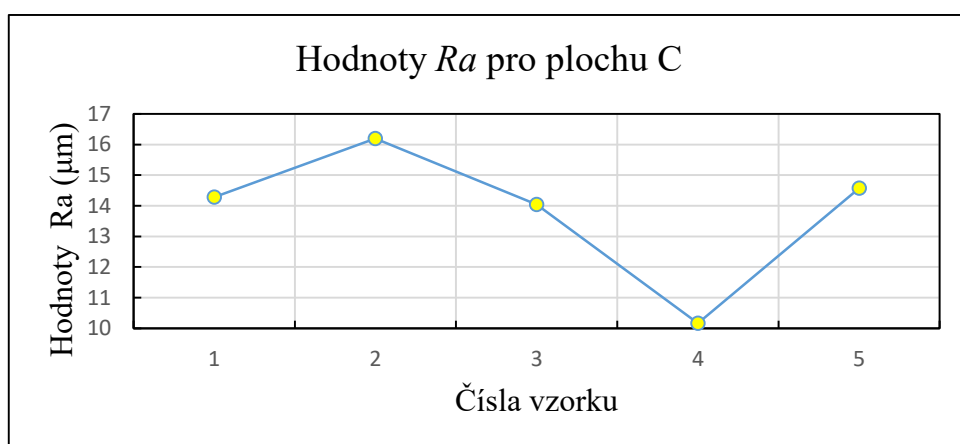
Obrázek 5.9 – Měření pomocí drsnoměru Mitutoyo Sj-210



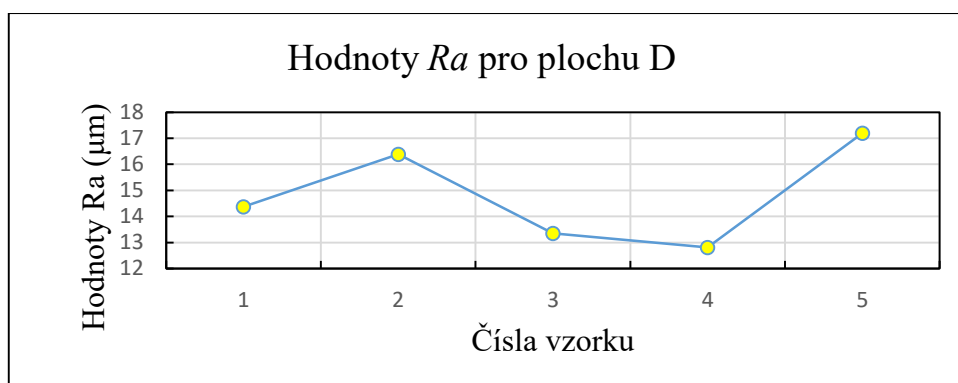
Obrázek 5.8 – Obrázek grafu parametru R_a pro plochu A



Obrázek 5.9 – Obrázek grafu parametru R_a pro plochu B



Obrázek 5.10 – Obrázek grafu parametru R_a pro plochu C



Obrázek 5.11 – Obrázek grafu parametru R_a pro plochu D

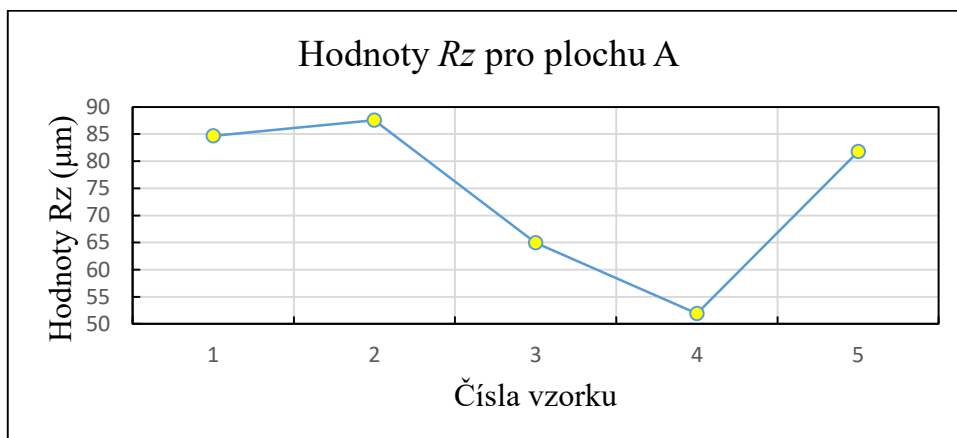
5.3.1 Vyhodnocení parametru (R_a) pomocí drsnoměru

Z grafů a tabulek (viz příloha 1) vyplývá, že vzorek č. 4 prokazuje téměř nejnížší hodnoty R_a u všech zkoumaných ploch (stran) s výjimkou plochy B. Nejnížší hodnota byla naměřena u vzorku č. 1. Rozdíl hodnot vzorku 1 B a 4 B je R_a (1, 010 μm). Největší naměřené hodnoty R_a prokázal vzorek s číslem 2. (viz Tabulka 5.17).

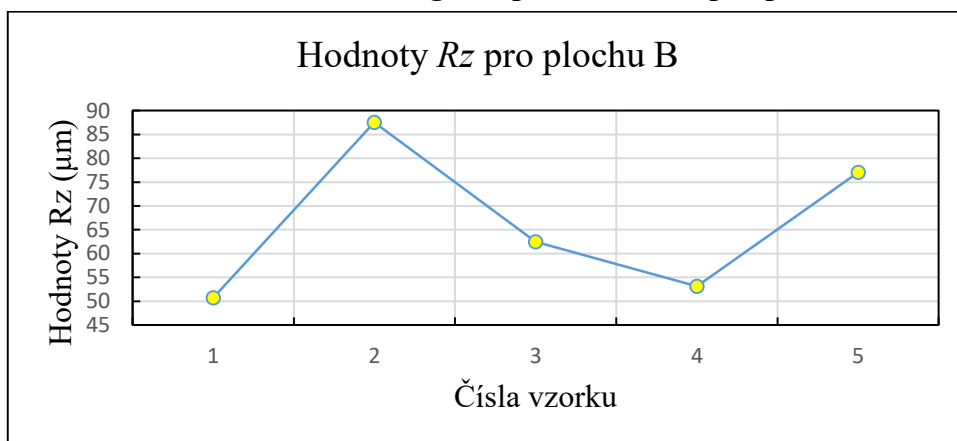
Tabulka 5.17 – Nejlepší dosažené výsledky u parametru (R_a)

Číslo vzorku	Plocha	Drsnoměr [μm]	Směrodatná odchylka [μm]
1	A	15,345	0,471
	B	9,319	0,505
	C	14,282	0,883
	D	14,371	0,693
2	A	17,207	1,514
	B	17,793	0,879
	C	16,191	0,174
	D	16,383	0,666
3	A	12,543	0,620
	B	12,366	0,704
	C	14,038	0,939
	D	13,349	1,044
4	A	9,654	0,044
	B	10,329	0,657
	C	10,168	0,428
	D	12,817	1,124
5	A	16,953	0,940
	B	14,937	0,589
	C	14,570	1,504
	D	17,202	0,680

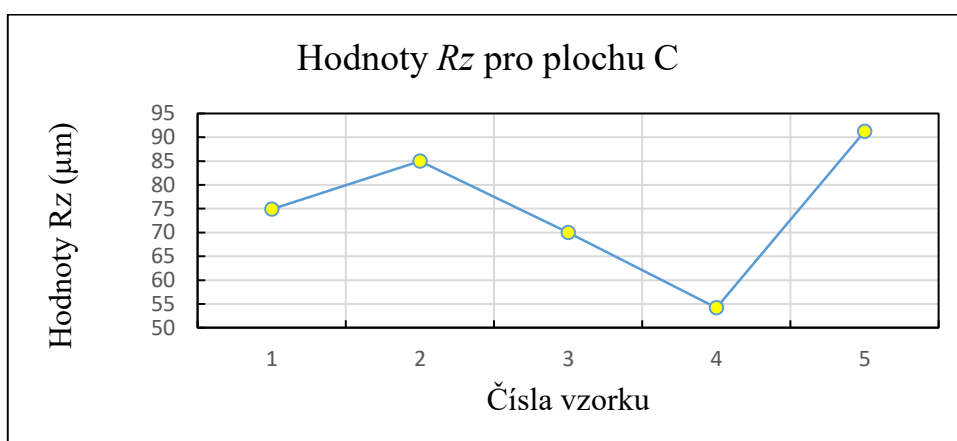
5.3.2 Grafy vzorků s parametry (R_z)



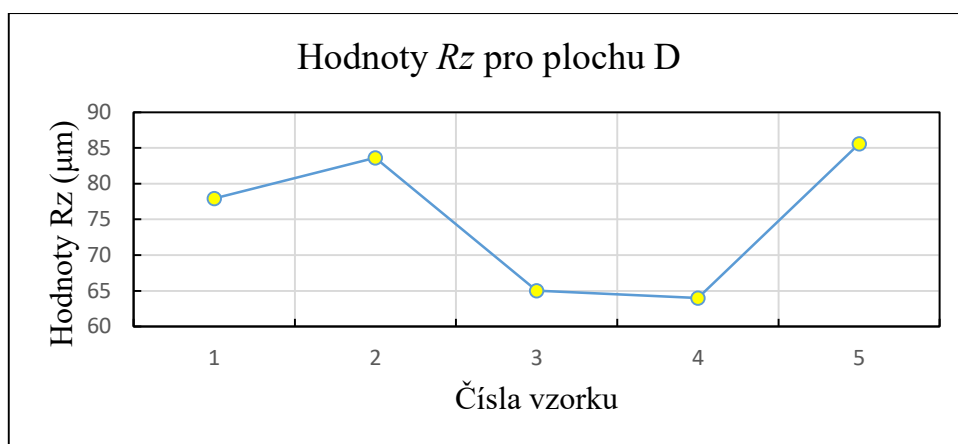
Obrázek 5.12 – Obrázek grafu parametru R_z pro plochu A



Obrázek 5.13 - Obrázek grafu parametru R_z pro plochu B



Obrázek 5.14 - Obrázek grafu parametru R_z pro plochu C



Obrázek 5.15 - Obrázek grafu parametru R_z pro plochu D

5.3.3 Vyhodnocení parametru (R_z) pomocí drsnoměru

Z grafu (obrázků) a tabulek vyplývá, že vzorek č. 4 prokazuje téměř nejnížší hodnoty R_z u všech zkoumaných ploch (stran) s výjimkou plochy B. Nejnížší hodnoty byly naměřeny u vzorku č. 1. (viz Tabulka 5.11) Rozdíl hodnot vzorku 1 B a 4 B je R_z (2,392 μm). Největší hodnoty parametru R_z u ploch A a B prokázal vzorek s číslem 2 a u ploch C a D vzorek 5. (viz Tabulka 5.11)

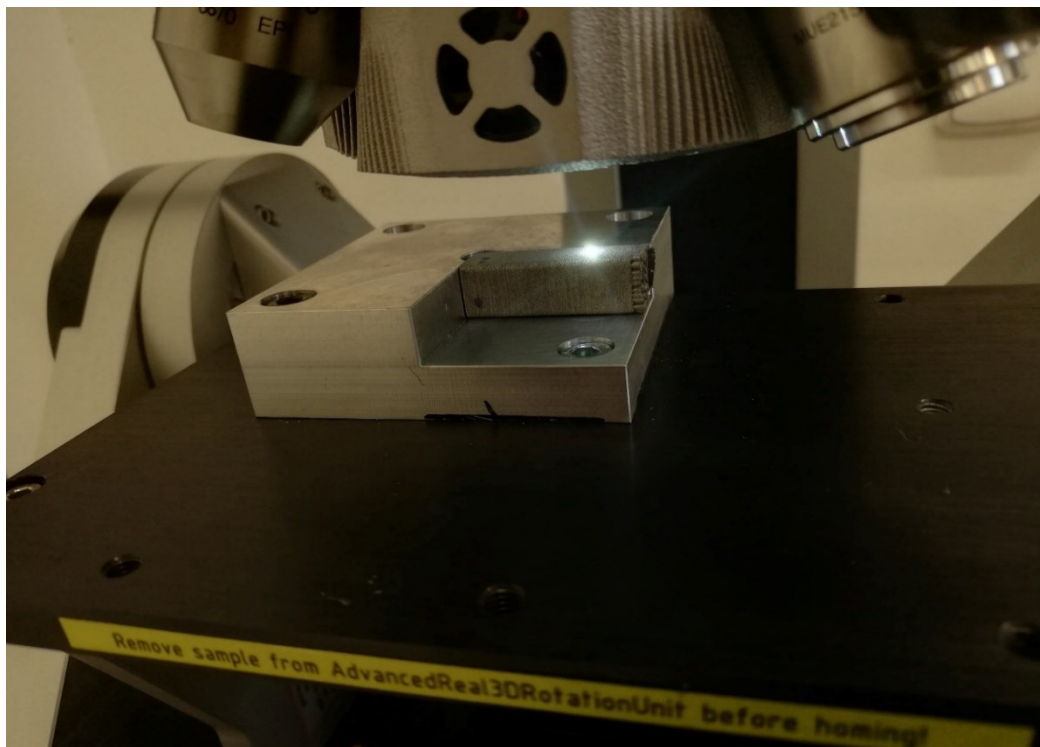
Tabulka 5.11 – Nejlepší dosažené výsledky u parametru (R_z)

Číslo vzorku	Plocha	Drsnoměr [μm]	Směrodatná odchylka [μm]
1	A	84,669	4,110
	B	50,716	3,080
	C	74,873	2,910
	D	77,937	2,608
2	A	87,554	5,606
	B	87,518	3,216
	C	84,958	2,486
	D	83,616	1,413
3	A	64,975	0,641
	B	62,49033	3,359
	C	69,95867	1,955
	D	65,02	4,114
4	A	51,92967	0,922
	B	53,10767	2,039
	C	54,16433	0,849
	D	64,007	2,440

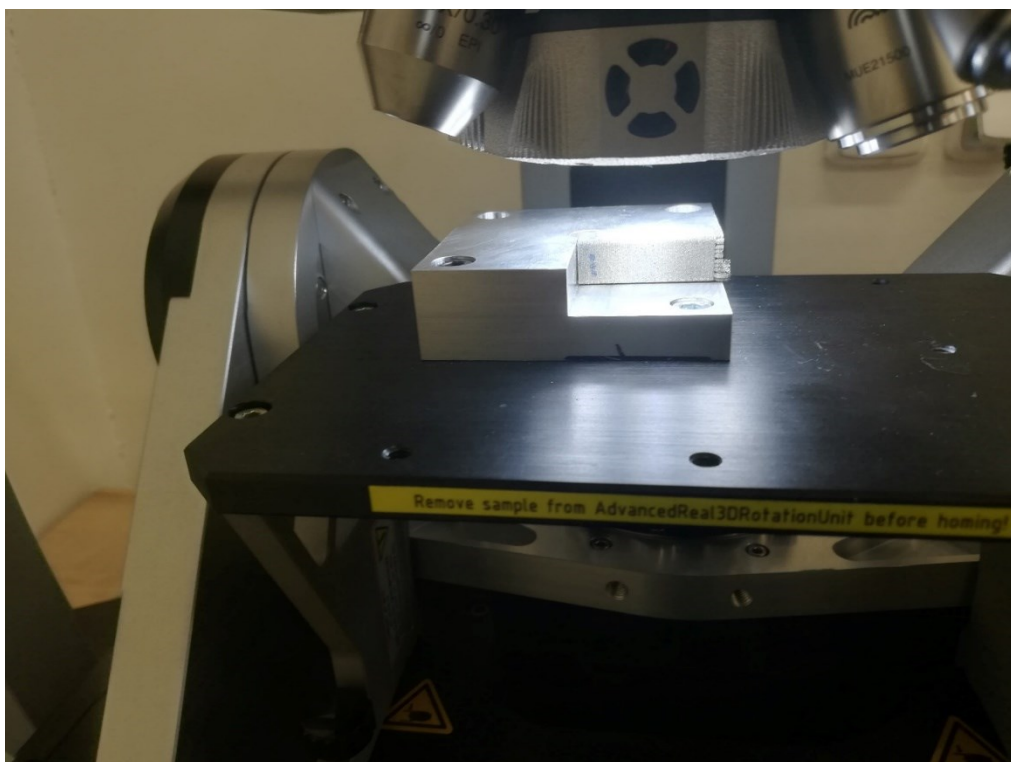
5	A	81,79033	2,910
	B	77,04033	5,701
	C	91,24167	6,451
	D	85,61067	5,587

5.4 Vyhodnocení vzorků měřených optickým mikroskopem Alicona InfiniteFocus G5

Po vytištění a označení vzorků (viz Obrázek 5.7, 5.8) o velikosti 10x10x30 mm probíhalo měření jednotlivých ploch na optickém mikroskopu Alicona InfiniteFocus G5 ve třech místech (bodech) (viz Obrázek 5.6). Byly vyhodnoceny parametry střední aritmetické odchylky profilu (***Ra***), největší výška profilu (***Rz***), aritmetická průměrná výška (***Sa***) a maximální výška vybrané oblasti (***Sz***). Následně byly hodnoty zpracovány v programu Microsoft Excel 2016 a poté vyhodnoceny. Naměřené hodnoty jsou zpracovány v tabulkách. (viz. příloha 1)

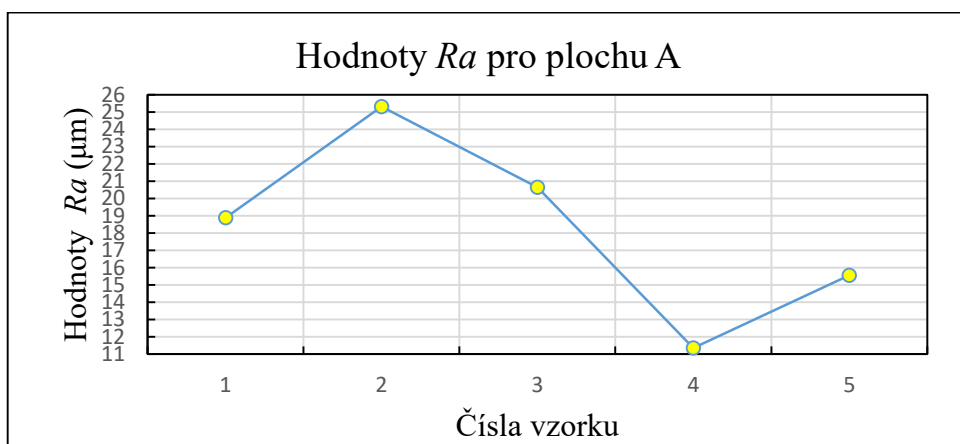


Obrázek 5.16 – Ukázka z měření vzorku

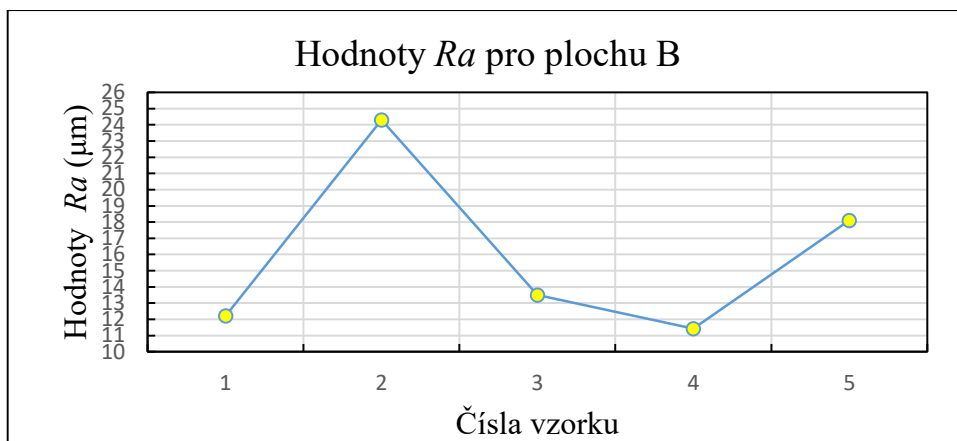


Obrázek 5.17 – Ukázka z měření vzorku č. 2

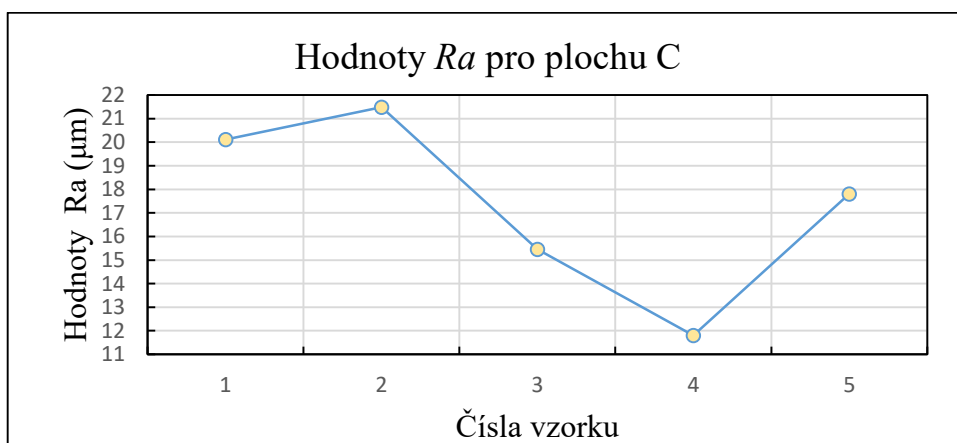
5.4.1 Grafy parametru (R_a)



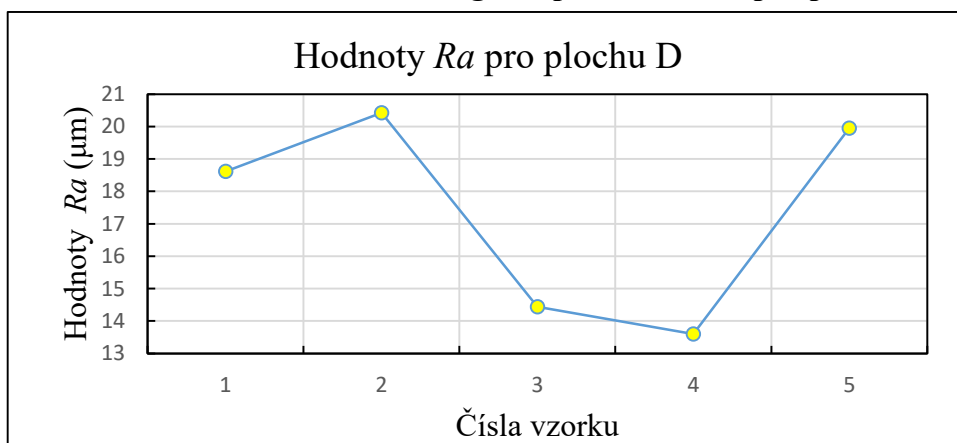
Obrázek 5.18 - Obrázek grafu parametru R_a pro plochu A



Obrázek 5.19 - Obrázek grafu parametru R_a pro plochu B



Obrázek 5.20 - Obrázek grafu parametru R_a pro plochu C



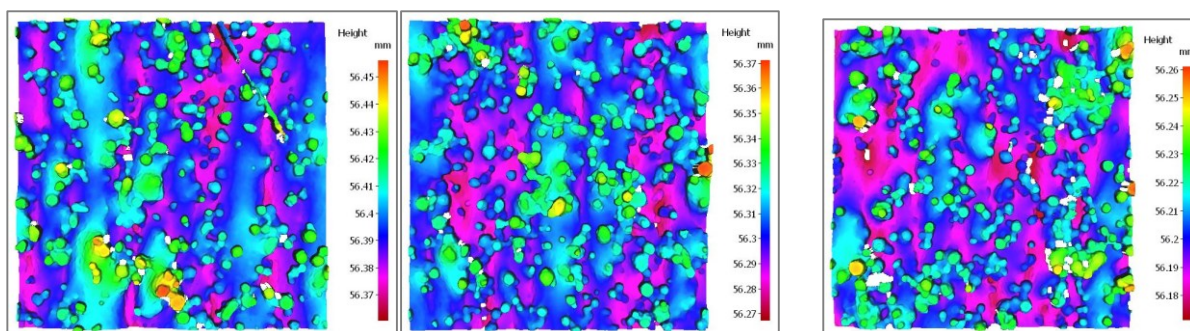
Obrázek 5.21 – Obrázek grafu parametru R_a pro plochu D

5.4.2 Vyhodnocení parametru (R_a) pomocí Alicony

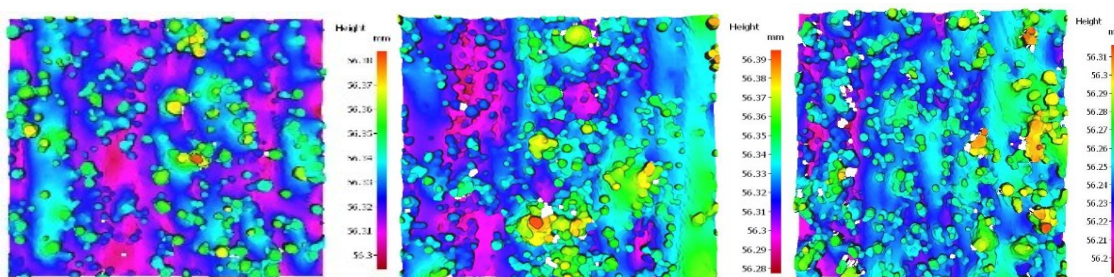
Z grafu (obrázků) a tabulek vyplívá, že vzorek č. 4 prokazuje nejnižší hodnoty R_a u všech zkoumaných ploch (stran). (viz Tabulka 5.18)

Tabulka 5.18 - Nejlepší dosažené výsledky u parametru (Ra)

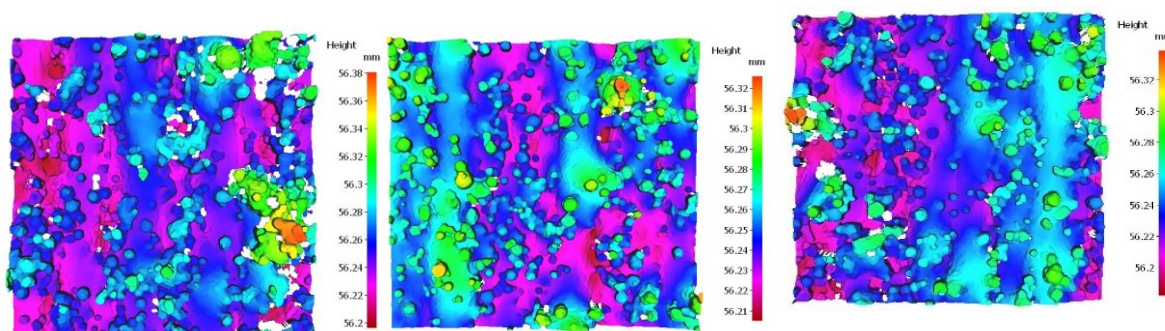
Číslo vzorku	Plocha	Alicona [μm]	Směrodatná odchylka [μm]
1	A	18,885	1,627
	B	12,211	1,560
	C	20,116	4,010
	D	18,618	0,672
2	A	25,315	3,419
	B	24,298	1,727
	C	21,482	3,560
	D	20,42	2,779
3	A	20,643	2,360
	B	15,452	2,235
	C	14,438	4,262
	D	11,355	0,486
4	A	11,426	1,869
	B	11,798	1,324
	C	13,597	1,377
	D	15,541	1,624
5	A	18,109	2,058
	B	17,801	1,922
	C	19,950	2,303
	D	18,885	2,223



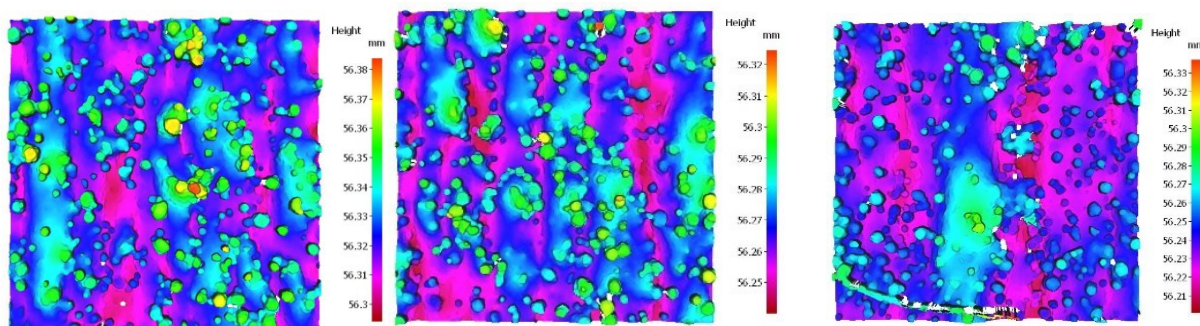
Obrázek 5.22 – Spektrum povrchu nejlépe dosaženého výsledků parametru Ra plochy s označením A byl vzorek s číslem 4



Obrázek 5.23 - Spektrum povrchu nejlépe dosaženého výsledků parametru R_a u plochy s označením B byl vzorek s číslem 4

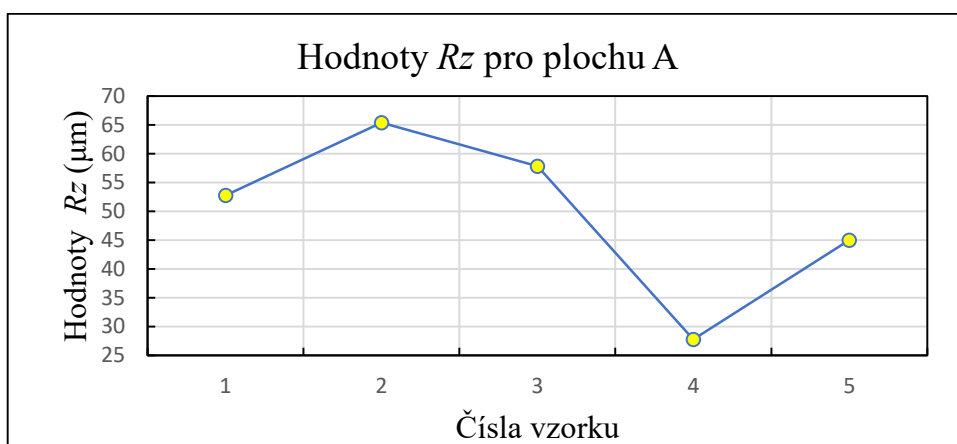


Obrázek 5.24 - Spektrum povrchu nejlépe dosaženého výsledků parametru R_a u plochy s označením C byl vzorek s číslem 4

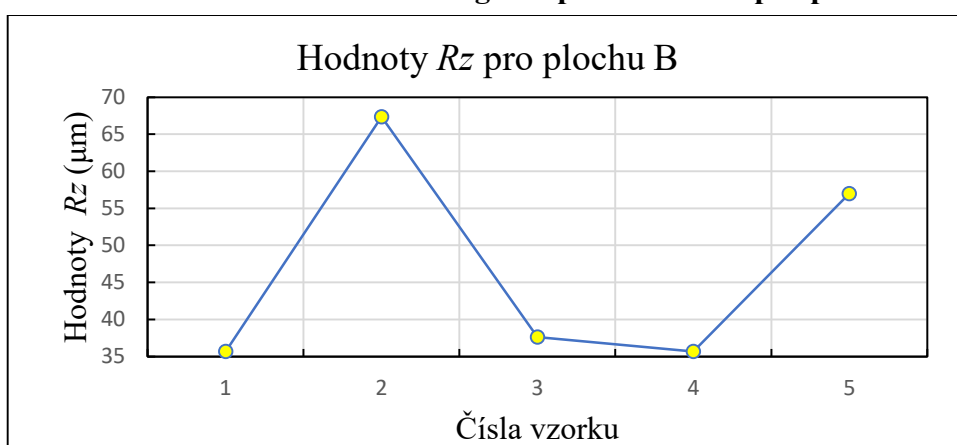


Obrázek 5.25 – Spektrum povrchu nejlépe dosaženého výsledku parametru R_a u plochy s označením D byl vzorek s číslem 4

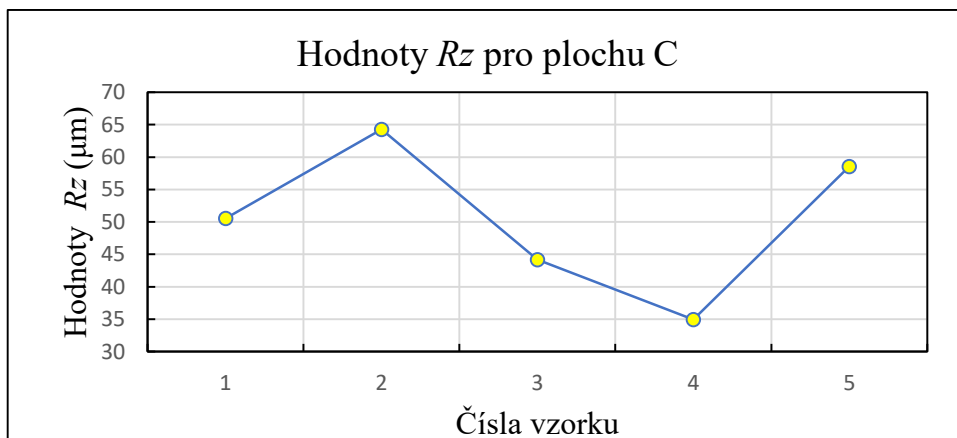
5.4.3 Grafy parametrů (R_z)



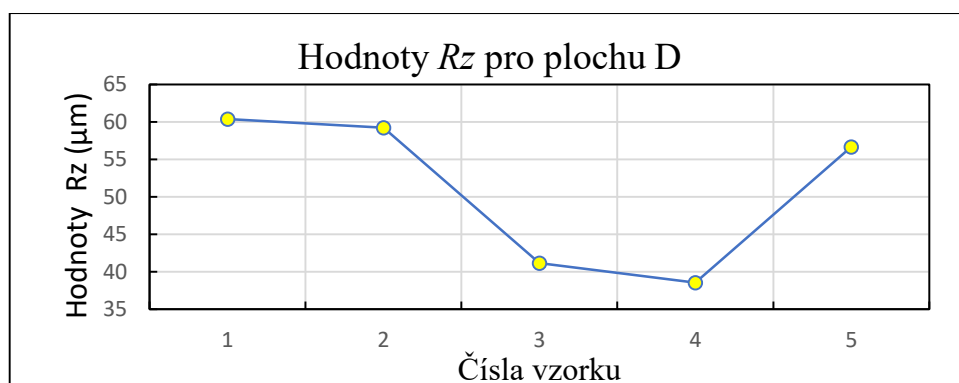
Obrázek 5.25 – Obrázek grafu parametru R_z pro plochu A



Obrázek 5.26 – Obrázek grafu parametru R_z pro plochu B



Obrázek 5.27 – Obrázek grafu parametru R_z pro plochu C



Obrázek 5.28 – Obrázek grafu parametru R_z pro plochu 4

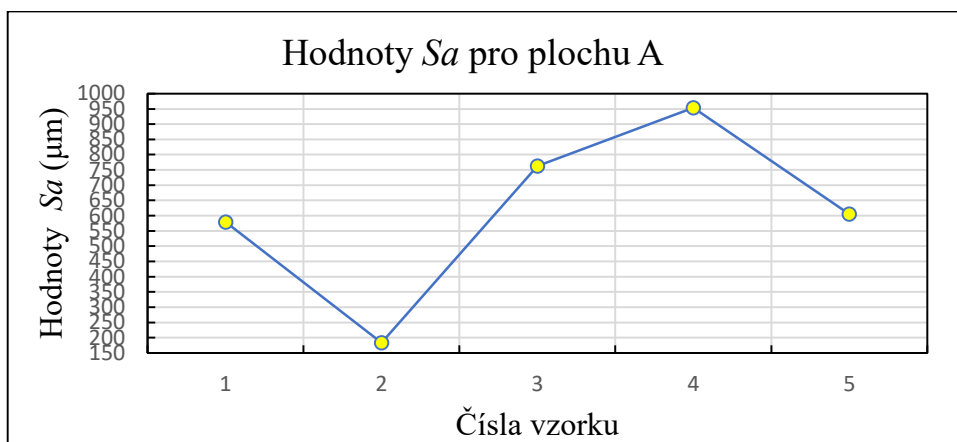
5.4.4 Vyhodnocení parametrů (R_z) pomocí Alicony

Z grafu (obrázků) a tabulek vyplívá, že vzorek č. 4 prokazuje téměř nejnižší hodnoty R_z u všech zkoumaných ploch (stran) s výjimkou plochy 42. Nejnižší hodnota plochy byla naměřena u vzorku č. 1. Rozdíl hodnot vzorku 12 a 42 je R_z (0,002 μm). Rozdíl těchto dvou naměřených hodnot je zanedbatelný a proto jsem uvedl obě hodnoty v Tabulce 5.19.

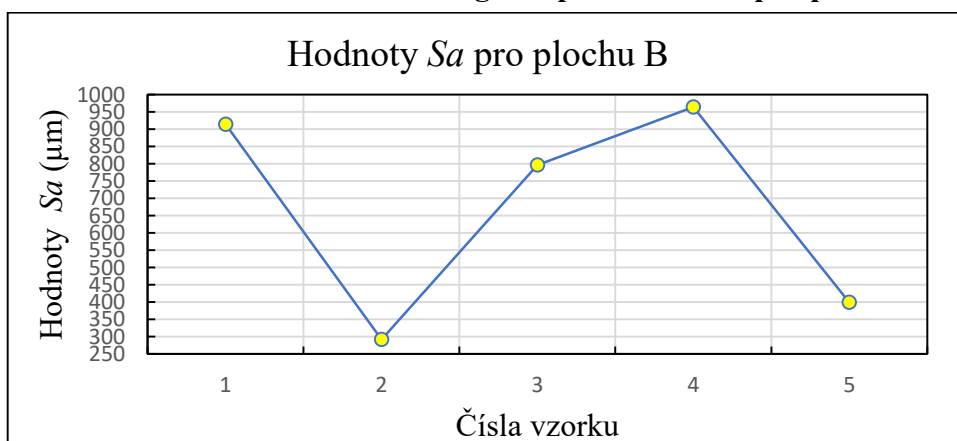
Tabulka 5.19 – Nejlepší dosažené výsledky u parametru (R_z)

Číslo vzorku	Plocha	Alicona [μm]	Směrodatná odchylka [μm]
1	A	52,805	2,544
	B	35,663	4,636
	C	50,56	8,278
	D	60,398	2,816
2	A	65,378	7,150
	B	67,364	3,801
	C	64,296	5,198
	D	59,246	5,337
3	A	57,838	6,419
	B	37,637	4,394
	C	44,186	9,889
	D	41,145	1,743
4	A	27,757	4,742
	B	35,665	2,995
	C	34,949	2,099
	D	38,576	3,824
5	A	44,994	4,716
	B	56,989	4,887
	C	58,520	4,910
	D	56,652	7,168

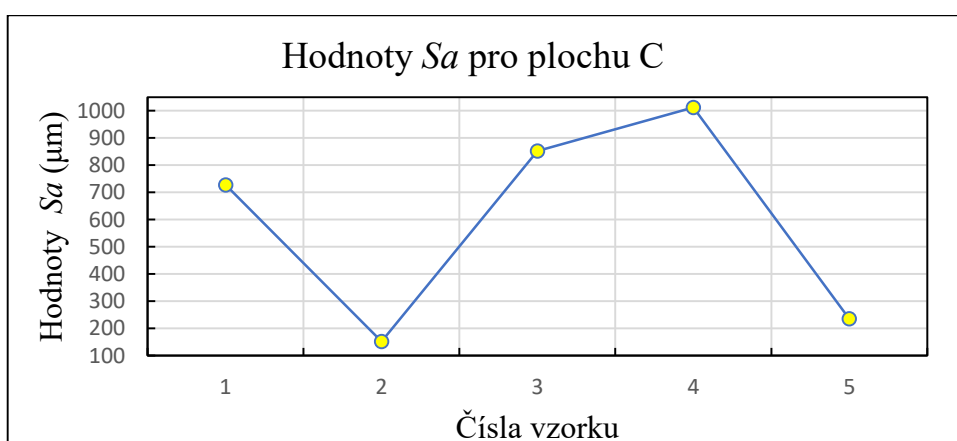
5.4.5 Grafy parametru (Sa)



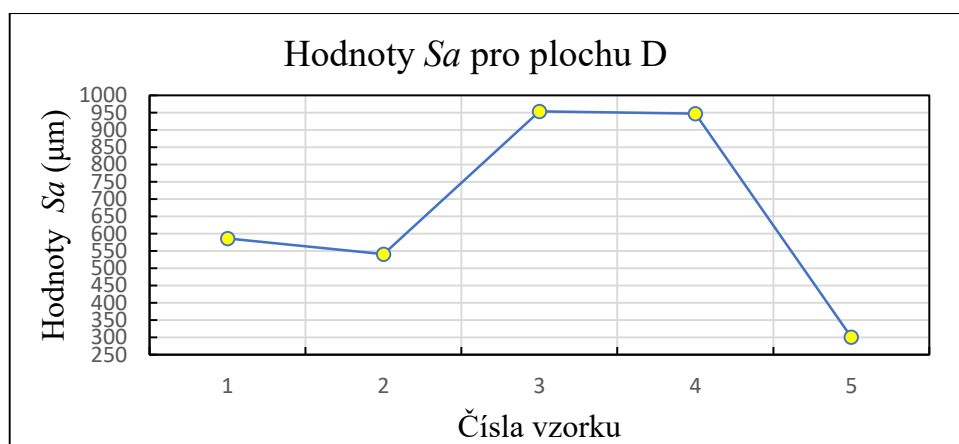
Obrázek 5.29 – Obrázek grafu parametru Sa pro plochu A



Obrázek 5.30 – Obrázek grafu parametru Sa pro plochu B



Obrázek 5.31 - Obrázek grafu parametru Sa pro plochu C



Obrázek 5.32 - Obrázek grafu parametru S_a pro plochu D

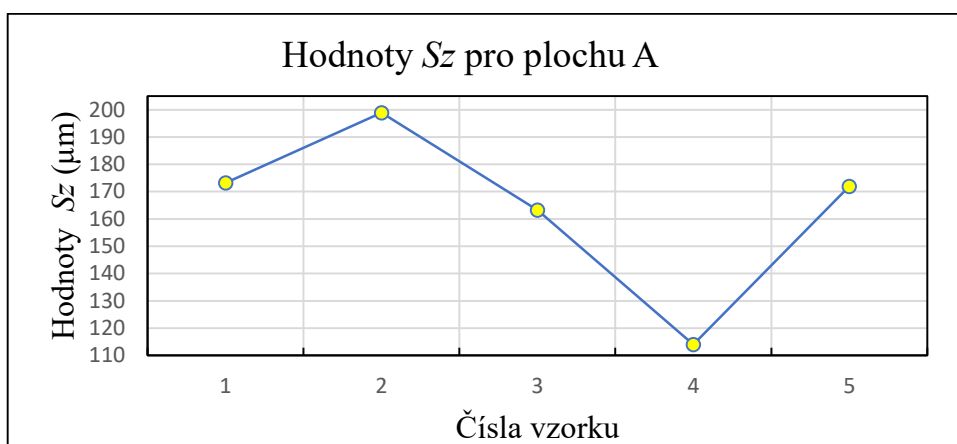
5.4.6 Vyhodnocení parametrů (S_a) pomocí Alicony

Z grafů a tabulek (příloha 1) vyplývá, že vzorek č. 2 prokazuje téměř nejnížší hodnoty S_a u všech zkoumaných ploch (stran) s výjimkou plochy 24. Nejnížší hodnota S_a plochy 4 byla naměřena u vzorku č. 5. Nejhorší výsledky prokázal vzorek č. 4. (viz Tabulka 5.20)

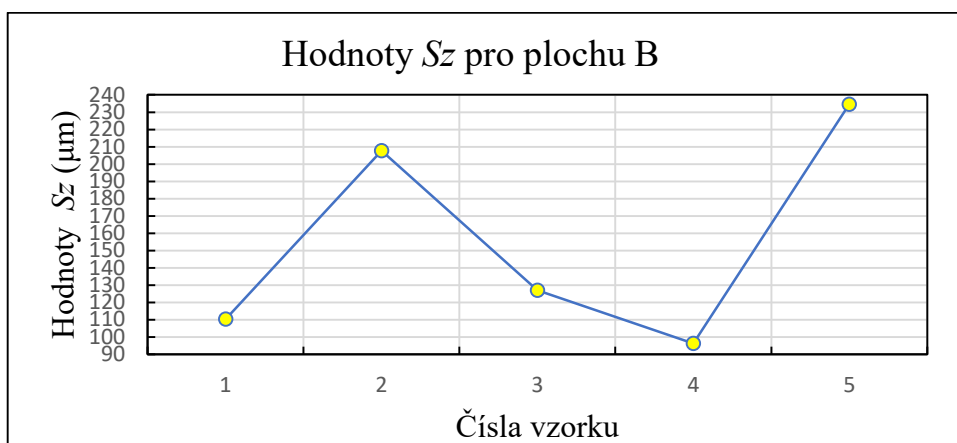
Tabulka 5.20 - Nejlepší dosažené výsledky u parametru (S_a)

Číslo vzorku	Plocha	Alicona [μm]	Směrodatná odchylka [μm]
1	A	579,072	69,841
	B	914,303	45,670
	C	727,57	7,582
	D	586,047	35,637
2	A	183,573	75,591
	B	292,107	60,676
	C	152,232	59,605
	D	540,665	47,728
3	A	763,09	42,708
	B	796,289	30,708
	C	852,489	88,824
	D	953,463	35,093
4	A	953,542	17,804
	B	964,531	32,055
	C	1011,819	13,101
	D	947,775	49,652
5	A	605,531	38,694
	B	399,084	84,734
	C	234,791	93,093
	D	301,432	24,864

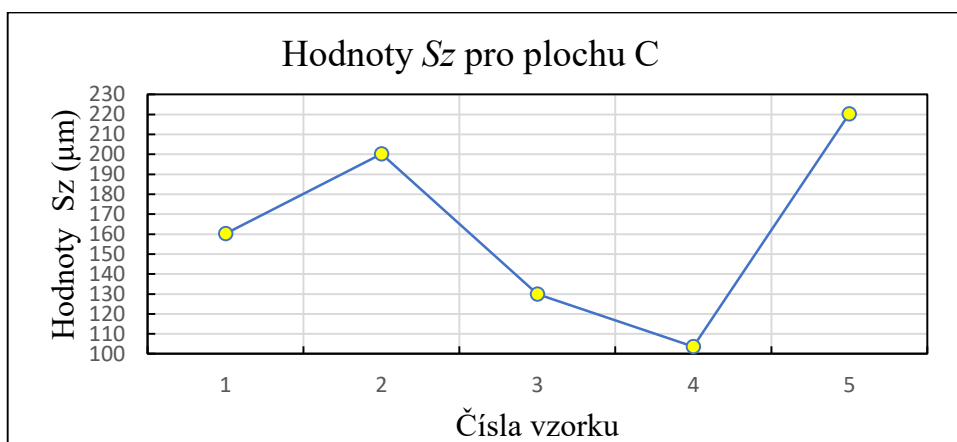
5.4.7 Grafy parametrů (S_z)



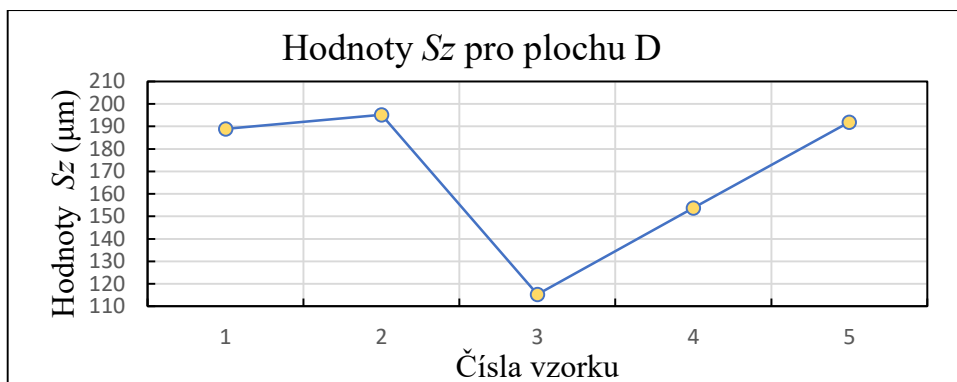
Obrázek 5.33 – Obrázek grafu parametru S_z pro plochu A



Obrázek 5.34 – Obrázek grafu parametru S_z pro plochu B



Obrázek 5.35 – Obrázek grafu parametru S_z pro plochu C



Obrázek 5.36 – Obrázek grafu parametru S_z pro plochu D

5.4.8 Vyhodnocení parametru (S_z) pomocí Alicony

Z grafu a tabulek (příloha 1) vyplývá, že vzorek č. 4 prokazuje téměř nejnižší hodnoty S_z u všech zkoumaných ploch. Nejnižší hodnota S_z plochy 4 byla naměřena u vzorku č. 3. Vzorky označeny číslem 2 a 5 měly nejhorší výsledky. (viz Tabulka 5. 21)

Tabulka 5.21 - Nejlepší dosažené výsledky u parametru (S_z)

Číslo vzorku	Plocha	Alicona [μm]	Směrodatná odchylka [μm]
1	A	173,225	3,583
	B	110,290	2,161
	C	160,317	7,401
	D	188,986	4,068
2	A	198,888	7,391
	B	207,676	4,930
	C	200,27	11,266
	D	195,187	30,037
3	A	163,286	4,817
	B	126,981	8,208
	C	129,985	10,712
	D	115,231	3,366
4	A	113,935	5,970
	B	96,257	3,363
	C	103,535	13,494
	D	153,789	14,946
5	A	171,889	10,938
	B	234,562	21,950
	C	220,312	3,735
	D	191,951	8,497

6 Porovnání výsledku měřidel

Vzorky byly měřeny na dvou měřicích zařízeních a to na drsnoměru Mitutoyo Sj-210 a optickém zařízení Alicona InfiniteFocus G5. Porovnávanými veličinami byly parametry R_a a R_z .



Obrázek 6.1 – Všechny tištěné vzorky (č. 1, 2, 3, 4, 5) na stavěcí desce

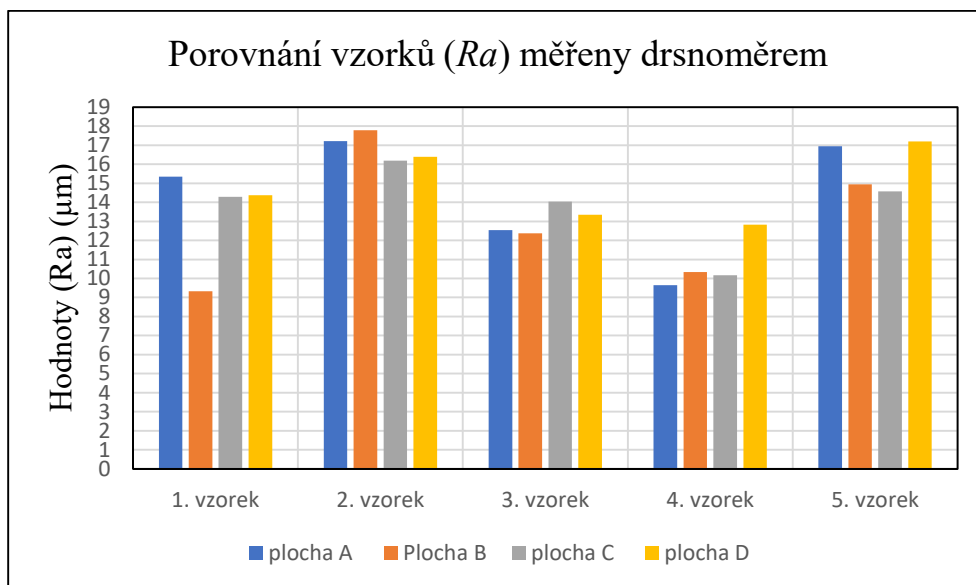
6.1 Porovnání naměřených hodnot (R_a)

Tabulka 6.1 – Tabulka všech naměřených hodnot (R_a) měření pomocí drsnoměru.

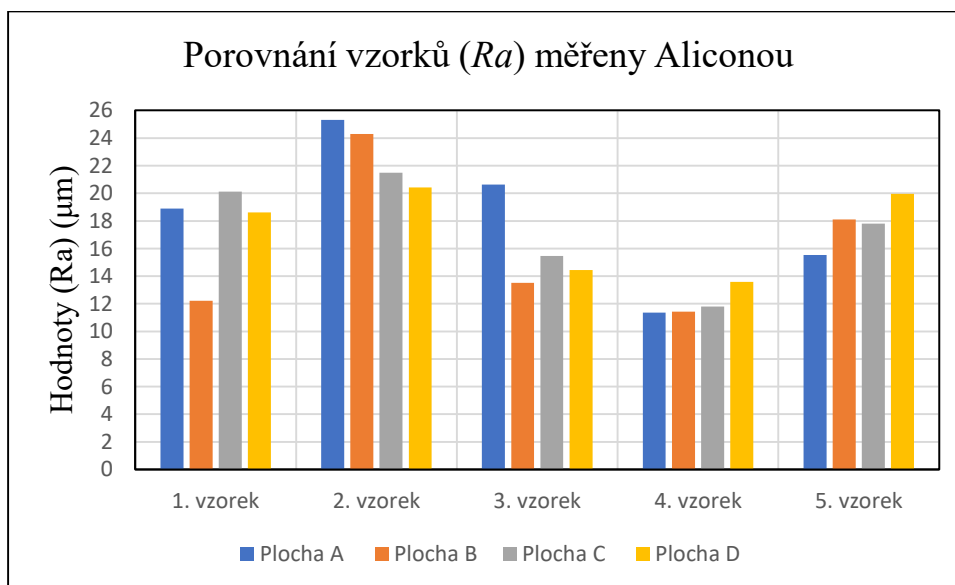
Hodnoty R_a (μm)	1. vzorek	2. vzorek	3. vzorek	4. vzorek	5. vzorek
Plocha A	15,345	17,207	12,543	9,654	16,953
Plocha B	9,319	17,793	12,366	10,329	14,937
Plocha C	14,282	16,191	14,038	10,168	14,570
Plocha D	14,371	16,383	13,349	12,817	17,202

Tabulka 6.2 - Tabulka všech naměřených hodnot (R_a) měření pomocí optického měřicího zařízení Alicona

Hodnoty R_a (μm)	1. vzorek	2. vzorek	3. vzorek	4. vzorek	5. vzorek
Plocha A	18,885	25,315	20,643	11,355	15,541
Plocha B	12,211	24,298	13,505	11,426	18,109
Plocha C	20,116	21,482	15,452	11,798	17,801
Plocha D	18,618	20,420	14,438	13,597	19,950



Obrázek 6.2 – Porovnávání parametrů Ra měřených pomocí drsnoměru



Obrázek 6.3 – Porovnávání parametrů Ra měřených pomocí optického měřicího zařízení

Tabulka 6.4 – Porovnání měřidel na parametru R_a

Číslo vzorku	Plocha	Drsnoměr [μm]	Alicona [μm]	Rozdíl [μm]
1	A	15,345	18,885	3,54
	B	9,319	12,211	2,892
	C	14,282	20,116	5,834
	D	14,371	18,618	4,247
2	A	17,207	25,315	8,108
	B	17,793	24,298	6,505
	C	16,191	21,482	5,291
	D	16,383	20,420	4,037
3	A	12,543	20,643	8,1
	B	12,366	13,505	1,139
	C	14,038	15,452	1,414
	D	13,349	14,438	1,089
4	A	9,654	11,355	1,701
	B	10,329	11,426	1,097
	C	10,168	11,798	1,63
	D	12,817	13,597	0,78
5	A	16,953	15,541	1,412
	B	14,937	18,109	3,172
	C	14,570	17,801	3,231
	D	17,202	19,950	2,748

Z výsledku naměřených hodnot vyplývá, že nejlepším místem pro tisk se stává vzorek označený číslem 4, který je umístěn v levém horním rohu pracovní komory (viz obrázek 6.6). Všechny cíle této práce byly splněny, a tudíž experiment považuji za úspěšný. Hodnoty měřené drsnoměrem vykazují menší hodnoty parametru R_a , než optický přístroj Alicona. (viz tabulka 6.4)

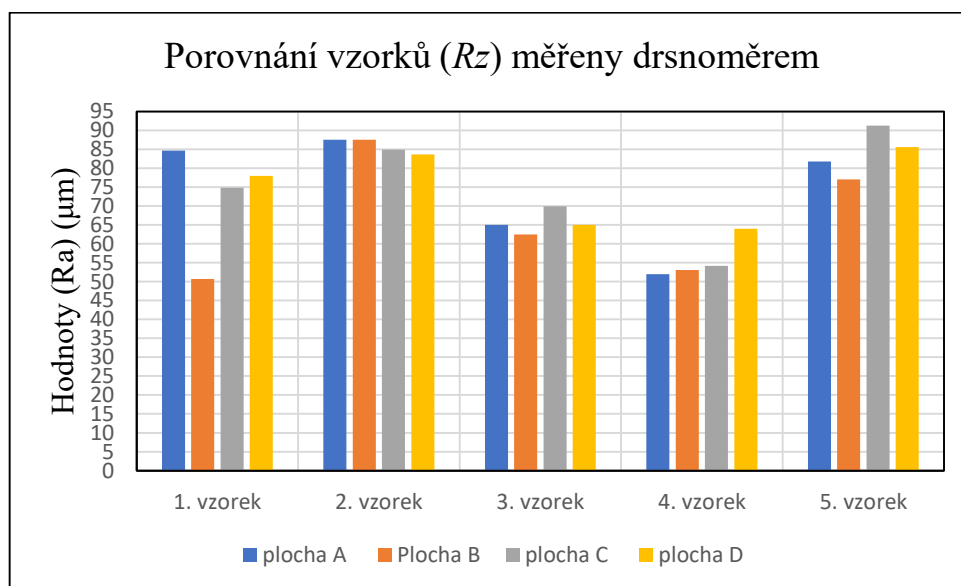
6.2 Porovnání naměřených hodnot (R_z)

Tabulka 6.3 – Tabulka všech naměřených hodnot (R_z) měření pomocí drsnoměru.

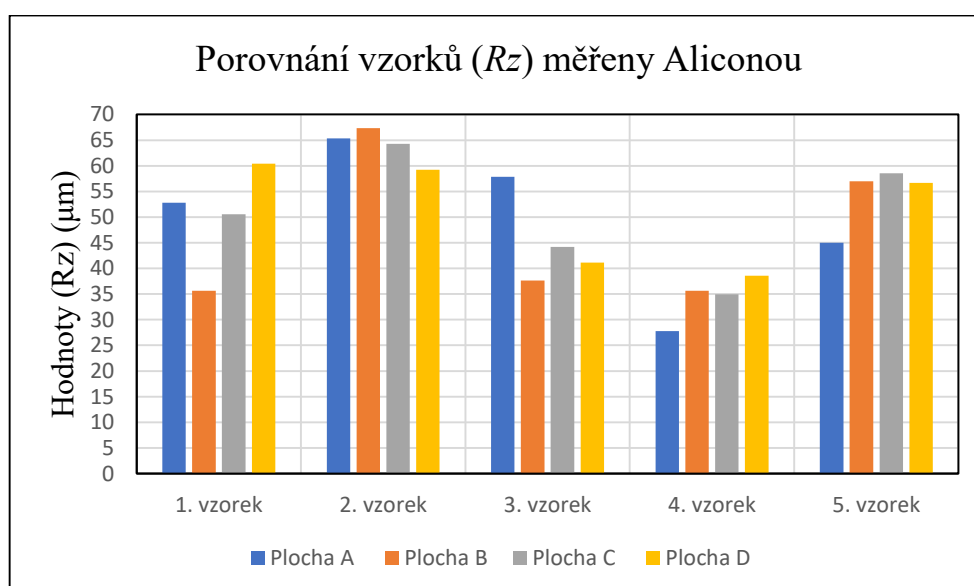
Hodnoty R_z (μm)	1. vzorek	2. vzorek	3. vzorek	4. vzorek	5. vzorek
Plocha A	84,669	87,554	64,975	51,930	81,790
Plocha B	50,716	87,518	62,490	53,108	77,040
Plocha C	74,873	84,958	69,959	54,164	91,242
Plocha D	77,937	83,616	65,020	64,007	85,611

Tabulka 6.5 – Tabulka všech naměřených hodnot (R_z) měření pomocí optického měřicího zařízení

Hodnoty R_z (μm)	1. vzorek	2. vzorek	3. vzorek	4. vzorek	5. vzorek
Plocha A	52,805	65,378	57,838	27,757	44,994
Plocha B	35,663	67,364	37,637	35,665	56,989
Plocha C	50,560	64,296	44,186	34,949	58,521
Plocha D	60,398	59,246	41,145	38,576	56,652



Obrázek 6.4 – Porovnávání parametrů R_z měřených pomocí drsnoměru



Obrázek 6.5 - Porovnávání parametrů R_z měřených pomocí optického měřicího zařízení

Tabulka 6.6 – Porovnání měřidel na parametru R_z

Číslo vzorku	Plocha	Drsnoměr [μm]	Alicona [μm]	Rozdíl [μm]
1	A	84,669	52,805	31,864
	B	50,716	35,663	15,053
	C	74,873	50,560	24,313
	D	77,937	60,398	17,539
2	A	87,554	65,378	22,176
	B	87,518	67,364	20,153
	C	84,958	64,296	20,662
	D	83,616	59,246	24,370
3	A	64,975	57,838	7,137
	B	62,490	37,637	24,854
	C	69,959	44,186	25,773
	D	65,02	41,145	23,875
4	A	51,93	27,757	24,173
	B	53,108	35,665	17,443
	C	54,164	34,949	19,215
	D	64,007	38,576	25,431
5	A	81,790	44,994	36,796
	B	77,040	56,989	20,052
	C	91,242	58,521	32,721
	D	85,611	56,652	28,958

Při porovnání naměřených hodnot aritmetické odchylky (R_a), jak u měření pomocí drsnoměru, tak u optického měřicího zařízení (Alicona), byl vyhodnocen nejlepší vzorek č. 4 s nejnižší naměřenou hodnotou drsnosti povrchu (R_a). Vzorek č. 2 prokázal největší naměřené hodnoty drsnosti povrchu (R_a), a tím se nám jeví jako nejméně vhodný. Z tabulek 6.1, 6.2 lze vyčíst všechny výsledky naměřených hodnot.

Povšimněme si také barevného vyobrazení naměřených parametrů, kde zelenou barvou jsou zdůrazněny parametry s nejmenší, a tudíž pro nás nejlepší drsností povrchu. Červená barva poukazuje na všechny vzorky a plochy, s největšími naměřenými hodnotami drsnosti povrchu (R_a).

Všechny tištěné vzorky nalezneme v obrázku 6.1, na kterém je také znázorněn směr proudění ochranného plynu (Argon) a směr nanášení kovového prášku. Tyhle faktory mají vliv na drsnost povrchu jednotlivých ploch. Vzorek 1B a 4B byl měřen drsnoměrem a měřicím zařízením Alicona. Tyhle vzorky měly nejnižší hodnoty drsnosti. Naopak vzorek 2B a 5B prokázal největší hodnoty vzhledem ke směru proudění ochranného plynu. Z toho vyplývá, že ochranný plyn působí negativně na plochy, které jsou umístěny nejbližší k němu. Na druhou stranu vzorky umístěné nejdál od proudění ochranného plynu měly nejnižší hodnoty drsnosti povrchu. Dalším faktorem, který má vliv na drsnost povrchu je směr nanášení kovového prášku, který se nanáší, ze směru plochy C. Vzorek č. 4 však prokázal ty nejlépe naměřené parametry (R_a), ze všech. V měření pomocí drsnoměru měl vzorek č.

2 nejhorší hodnoty (Ra). Ovšem hodnoty měřeny pomocí Alicony nám uvedly nejhorší vzorek označený č. 2 a odhalily nekvalitní povrch u vzorku č. 1. Při měření drsnoměrem mohlo dojít k chybě vlivem nerovnoměrného uložení vzorku na měřicí podložku. Z těchto výsledků jsme se dozvěděli, že směr nanášení kovového prášku ovlivňuje drsnost povrchu. Čím blíže byly vzorky umístěny k nanášecí vrstvě, tím bylo dosaženo kvalitnější (nižší hodnoty) drsnosti povrchu (Ra). Vzorky umístěny ve větší vzdálenosti od směru nanášení kovového prášku prokázaly, horší parametry drsnosti. Porovnání vzorků a jejich ploch je zobrazeno na obrázku 6.2, 6.3. Výsledky naměřených hodnot pomocí drsnoměru a Alicony jsou srovnatelné. Drsnoměrem byli naměřeny menší hodnoty parametru (Ra) než u optického měřicího zařízení Alicona.

7 Závěr

Bakalářská práce pojednává o měření drsnosti povrchů v závislosti na umístění v pracovní komoře procesu SLM, což je proces tavení, kde dochází k tavení vrstvy práškového kovu laserem, podle předem připraveného programu. Pro tisk vzorků byla zvolena 3D tiskárna Renishaw AM400, kde použitým materiálem byla korozivzdorná ocel 316L. Cílem práce bylo zjistit, které místo v pracovní komoře je nejvýhodnější pro tisk a má nejmenší hodnoty drsnosti povrchu (R_a , R_z).

V práci jsem se zaměřil na pojem 3D tisk neboli aditivní výrobu. Konkrétně jsem se zabýval procesem Selektivního laserového tavení (SLM). V případě SLM je kvalita závislá na nastavených parametrech stroje, které nám ovlivňují kvalitu vytištěného vzorku, jako je tloušťka vrstvy, úhel pootočení, skenovací rychlost, výkon laseru, šrafovací vzdálenost, skenovací posunutí, skenovací strategie a přehřátí substrátu.

U měření drsnosti povrchu při technologii SLM jsou zmíněny efekty, které negativně ovlivňují povrch. Kuličkování (balling effect), rozstřík částic (Spattering particle) a částečně roztavené kovové částice.

Pro experimentální část bylo vytištěno 5 vzorků o rozměrech 10x10x30 mm, které byly rozmístěny v rozích pracovní komory, a jeden byl umístěn ve středu této pracovní komory. Vše bylo vyrobeno na 3D tiskárně Renishaw AM400. Parametry tisku se u všech vzorků shodovaly. Vzorky byly označeny čísly a jejich strany tečkami pro orientaci uložení v pracovní komoře. Poté byly měřeny optickým měřícím zařízením Alicona InfiniteFocus 5 a kontaktním drsnoměrem Mitutoyo Sj-210. Každá hodnota měření byla vyhodnocená a porovnána jednotlivě.

Data zaznamenaná na drsnoměru mají vyšší hodnoty u profilového parametru R_a stejně tak jako hodnoty parametru R_z . Naměřené hodnoty parametru drsnosti jsou si bližší, a proto je menší jejich směrodatná odchylka. Data profilových parametru R_a a R_z naměřených pomocí optického mikroskopu, jsou vyšší a mají mezi sebou větší rozdíly. Optické měření je pravděpodobně citlivější a zároveň i přesnější. Každopádně výsledky mezi sebou až na výjimky korespondovali, a proto můžeme všechna data uznat za použitelné.

Z výsledku naměřených hodnot vyplývá, že nejlepším místem pro tisk se stává vzorek označený číslem 4, který je umístěný v levém horním rohu pracovní komory (viz obrázek 6.1).

Vzorek označený číslem 2, byl vyhodnocen jako nejhorší, kvůli vysokým naměřeným hodnotám drsnosti povrchu (R_a). Největší naměřené hodnoty parametru (R_a), se prokázaly u vzorků, které byly umístěny v blízkosti směru proudění ochranného plynu (Argonu).

Vzorky umístěné ve větší vzdálenosti od směru proudění ukázaly výrazně nižší hodnoty. Dalším faktorem, který měl vliv na drsnost povrchu je směr nanášení kovového prášku. Vzorky umístěny blíže ke směru nanášení prokázaly nižší hodnoty parametru (R_a),

než vzorky umístěné na druhé straně pracovní komory. Všechny cíle této práce byly splněny, a tudíž experiment považuji za úspěšný.

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] "3D printing scales up". The Economist. 5 September 2013.
- [2] Excell, Jon (23 May 2010). "The rise of additive manufacturing". The Engineer. Retrieved 30 October 2013.
- [3] Learning Course: Deep Dive Additive Manufacturing - Deep Dive: Additive Fertigung. Industrie 4.0 Management-Training der TMG München [online]. Dostupné z: <https://www.tmg-muenchen.de/training-course/11/Additive-Manufacturing?flang=en>
- [4] Eyers, D. and K. Dotchev (2010) "Technology review for mass customisation using rapid manufacturing" Assembly Automation 30 (1): 39- 46.
- [5] McMenamin, P. G., Quayle, M. R., McHenry, C. R., & Adams, J. W. (2014) "The production of anatomical teaching resources using threedimensional (3D) printing technology" Anatomical sciences education 7 (6): 479-486.
- [6] Schubert, C., M. C. Van Langeveld, and L.A. Donoso (2014) "Innovations in 3D printing: a 3D overview from optics to organs" British Journal of Ophthalmology 98 (2): 159-161./
- [7] Banks, J (2013) "Adding value in additive manufacturing: researchers in the United Kingdom and Europe look to 3D printing for customization" IEEE Pulse 4 (6): 22-26./
- [8] Cui, X., Boland, T., DD'Lima, D., & K Lotz, M. (2012) "Thermal inkjet printing in tissue engineering and regenerative medicine" Recent patents on drug delivery & formulation 6 (2): 149-155.
- [9] Angrish, A. A (2014) "A critical analysis of additive manufacturing technologies for aerospace applications" 2014 IEEE Aerospace Conference 1-6
- [10] Liu, Z., Zhang, M., Bhandari, B., & Wang, Y. (2017) "3D printing: Printin g precision and application in food sector" Trends in Food Science & Technology 69: 83-94.
- [11] Song, S., Hou, Y., Guo, M., Wang, L., Tong, X., & Wu, J. (2017) "An investigation on the aggregate-shape embedded piezoelectric sensor for civil infrastructure health monitoring" Construction and Building Materials 131: 57-65.
- [12] Selektivní technologie laserového tavení (SLM). 3D technologie. Blog o technologiích IQB. Profesionální a průmyslové 3D tiskárny a 3D skenery, 3D tisk, 3D skenování, 3D řešení v Moskvě [online]. Copyright © 2020 iQB Technologies [cit. 15.05.2020].
Dostupné z: <https://blog.iqb.ru/slm-technology/>
- [13] Fdm 3D печать: жаростойкий пластик. T-31 | Коктейль знаний [online]. Dostupné z: <https://t-31.ru/fdm-3d-pechat/>

- [14] EANE, R. B. Metal Powder Effects on Selective Laser Sintering. PhD thesis. University of Leeds, 2002, pp. 236.
- [15] SIMONELLI, M., TUCK, C., ABOULKHAIR, N. T., MASKERY, I., ASHCROFT, I., WILDMAN, R. D., HAGUE, A R. A Study on the Laser Spatter and the Oxidation Reactions During Selective Laser Melting of 316L Stainless Steel, Al-Si10-Mg, and Ti-6Al-4V. In: Metallurgical and Materials Transactions A (2015). doi: 10.1007/s11661-015-2882-8.
- [16] SLM stampante 3d schema funzionamento – stampa 3d forum 2 [online]. [cit. 2019-04-03] Dostupné z: <https://www.stampa3d-forum.it>
- [17] YADROITSEV, I. Selective laser melting: Direct manufacturing of 3D-objects by selective laser melting of metal, 2009
- [18] Li R, Liu J, Shi Y, Wang L, Jiang W. Balling behavior of stainless steel and nickel powder during selective laser melting process. International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 2012;59(9–12):1025-1035. DOI: 10.1007/s00170-011-3566-1
- [19] Das S. Physical aspects of process control in selective laser sintering of metals. Advanced Engineering Materials. 2003;5(10):701-711. DOI: 10.1002/adem.200310099
- [20] Tolochko NK, Mozzharov SE, Yadroitsev IA, Laoui T, Froyen L, Titov VI, et al. Balling processes during selective laser treatment of powders. Rapid Prototyping Journal. 2004;10(2): 78-87. DOI: 10.1108/13552540410526953
- [21] Fausto Bernardini, Holly E. Rushmeier (2002). "The 3D Model Acquisition Pipeline GAS" (PDF). Comput. Graph. Forum. 21 (2): 149–72. doi:10.1111/1467-8659.00574.
- [22] Syrjälä S, Tuomi J. Rapid prototyping: Mallien, prototyypien ja työkalujen pikavalmistus [Internet]. 1997. (Teknologiakatsaus/Teknologian kehittämiskeskus TEKES). Dostupné z: <https://hamk.finna.fi/Record/vanaicat.41156>
- [23] Hagedorn Y-C, Balachandran N, Meiners W, Wissenbach K, Poprawet R. SLM of netshaped high strength ceramics: New opportunities for producing dental restorations. In: SFF Symposium [Internet]. Austin, TX, USA: University of Texas at Austin; 2011. Dostupné z: <https://sffsymposium.engr.utexas.edu/Manuscripts/2011/2011-42Hagedorn.pdf>
- [24] Juste E, Petit F, Lardot V, Cambier F. Shaping of ceramic parts by selective laser melting of powder bed. Journal of Materials Research. 2014;29(17):2086-2094. DOI: 10.1557/jmr.2014.127
- [25] AM Guide. Object moved [online]. Copyright © [cit. 16.05.2020]. Dostupné z: <https://www.renishaw.cz/cs/--41140>

- [26] Gibson I, Shi D. Material properties and fabrication parameters in selective laser sintering process. *Rapid Prototyping Journal*. 1997;3(4):129-136. DOI: 10.1108/13552549710191836
- [27] Joguet D, Costil S, Liao H, Danlos Y. Porosity content control of CoCrMo and titanium parts by Taguchi method applied to selective laser melting process parameter. *Rapid Prototyping Journal*. 2016;22(1):20-30. DOI: 10.1108/RPJ-09-2013-0092
- [28] Wang Z, Shi Y, He W, Liu K, Zhang Y. Compound process of selective laser processed alumina parts densified by cold isostatic pressing and solid state sintering: Experiments, full process simulation and parameter optimization. *Ceramics International*. 2015;41(2): 3245-3253. DOI: 10.1016/j.ceramint.2014.11.014
- [29] Z. Sun, X. Tan , S. Tor , W. Yeong Selective laser melting of 316L stainless steel with excellent porosity and high assembly speeds *Mater Des* , 104 (2016) , s. 197 – 204
- [30] E. Liverani , S. Toschi , L. Ceschini , A. Fortunato Influence of selective laser melting (SLM) process parameters on microstructure and mechanical properties of austenitic 316L stainless steel *J Mater Process Technol* , 249 (2017), s. 255 – 263
- [31] LI, Hua, Maziara RAMEZANI, Ming LI, Chao MA a Jyhwen WANG. Tribological performance of selective laser melted 316L stainless steel. 2018, 121-129. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2018.07.021>
- [32] Tribologický výkon selektivní laserové tavené nerezové oceli 316L. *Tribology International* [online]. 2018, 2018(128), 121-129 [cit. 2020-05-16]. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2018.07.021>. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0301679X18303499?via%3Dihub>
- [33] Cherry, J. A., Davies, H. M., Mehmood, S. et al. Investigation into the effect of process parameters on microstructural and physical properties of 316L stainless steel parts by selective laser melting. *Int J Adv Manuf Technol* 76, 869–879 (2015). <https://doi.org/10.1007/s00170-014-6297-2>
- [34] Alrbaey, K., Wimpenny, D., Tosi, R. et al. On Optimization of Surface Roughness of Selective Laser Melted Stainless Steel Parts: A Statistical Study. *J. of Materi Eng and Perform* 23, 2139–2148 (2014). Dostupné z: <https://doi.org/10.1007/s11665-014-0993-9>
- [35] Vlastnosti oceli AISI 316 připravené 3D tiskem [online]. Ostrava, 2018 [cit. 2020-05-15]. Diplomová práce. Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava Fakulta metalurgie a materiálového Inženýrství Katedra materiálového inženýrství. Vedoucí práce Ing. Martin Kraus, Ph.D. Dostupné z : https://dspace.vsb.cz/handle/10084/128892?fbclid=IwAR0ZIS99o8sxSOPTbx-nrQCiab4c86ttWPm-giy1S3eE5Ku_hCVONJoY0cA.

- [36] Delgado, J., Ciurana, J. & Rodríguez, C. A. Influence of process parameters on part quality and mechanical properties for DMLS and SLM with iron-based materials. *Int J Adv Manuf Technol* 60, 601–610 (2012). <https://doi.org/10.1007/s00170-011-3643-5>
- [37] Alrbaey, K., Wimpenny, D. I., Al-Barzinjy, A. A. et al. Electropolishing of Re-melted SLM Stainless Steel 316L Parts Using Deep Eutectic Solvents: 3×3 Full Factorial Design. *J. of Materi Eng and Perform* 25, 2836–2846 (2016). Dostupné z: <https://doi.org/10.1007/s11665-016-2140-2>
- [38] GREEN, Sarah, Allan RENNIE a Tn ABRAM, ed. Researchgate.net [online]. 2011, Zář 2011, 2011(1), 8 [cit. 2020-05-15]. DOI: 10.1201/b11341-82. Dostupné z: https://www.researchgate.net/profile/Allan_Rennie/publication/300064369_Surface_finishing_techniques_for_SLM_manufactured_stainless_steel_316L_components/links/5ad4a6cd458515c60f545493/Surface-finishing-techniques-for-SLM-manufactured-stainless-steel-316L-components.pdf
- [39] Influence of laser processing parameters on the surface characteristics of 316L stainless steel manufactured by selective laser melting. *ScienceDirect* [online]. 2020, 2020(1), 1 [cit. 2020-05-15]. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2019.12.061>. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2214785319340726#s0035>
- [40] Y. Liu, Y. Yang, S. Mai, D. Wang, C. Song, *Mater. Des.* 87 (2015) 797–806
- [41] N. Nutal, P. Rochus, JP Collette, J. Crahay, H. Jochem, M. Larnicol, J. Magnien, C Masse, O. Rigo. JF Vanhumbeeck, L. Pambaguian Surface engineering for parts made by additive manufacturing. IAC-15,66. *Int. Astronaut. Congr.* (2015), str. C2
- [42] I. Yadroitsev, I. Smurov Surface morphology in selective laser melting of metal powders *Phys. Procedia* (2011), 10,016 / j.phpro.2011.03.034
- [43] W. J. Sames, F. A. List, S. Pannala, R. R. Dehoff, S. S. Babu The metallurgy and processing science of metal additive manufacturing *Int. Mater. Rev.*, 61 (2016), 10.1080/09506608.2015.1116649
- [44] M. Simonelli, C. Tuck, N. T. Aboulkhair, I. Maskery, I. Ashcroft, R. D. Wildman, R. Hague A study on the laser spatter and the oxidation reactions during selective laser melting of 316L stainless steel, Al-Si10-Mg, and Ti-6Al-4V *Metall. Mater. Trans. A Phys. Metall. Mater. Sci.*, 46 (2015), pp. 3842-3851, 10.1007/s11661-015-2882-8
- [45] On morphological surface features of the parts printed by selective laser melting (SLM). *ScienceDirect* [online]. 2018, 2018(1), 1 [cit. 2020-05-15]. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.addma.2018.10.011>. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2214860418304998>

- [46] E. Louvis, P. Fox, C.J. Sutcliffe Selective laser melting of aluminium components J. Mater. Process. Technol., 211 (2011), pp. 275-284, 10.1016/j.jmatprotec.2010.09.019
- [47] M. Simonelli, C. Tuck, N. T. Aboulkhair, I. Maskery, I. Ashcroft, R. D. Wildman, R. Hague A study on the laser spatter and the oxidation reactions during selective laser melting of 316L stainless steel, Al-Si10-Mg, and Ti-6Al-4V Metall. Mater. Trans. A Phys. Metall. Mater. Sci., 46 (2015), pp. 3842-3851, 10.1007/s11661-015-2882-8
- [48] Bastian Blinn. Determination of the influence of a stress-relief heat treatment and additively manufacture surface on the fatigue behavior of selectively laser melted AISI 316L by using efficient short-time procedures. Contents lists available at Sci.,
- [49] DRÁBEK, M. Měření drsnosti řezných hran při laserovém dělení kovů. Bakalářská práce. VÚT Brno, 2012, 30-32 s.
- [50] Norma ČSN EN ISO 4287, Geometrické požadavky na výrobky (GPS) Struktura povrchu, Profilová metoda – Termíny, definice, a parametry struktury povrchu. Český normalizační institut, březen 1999
- [51] ČSN EN ISO 4287: Geometrické požadavky na výrobky. Praha: Český normalizační institut, 1999. 24 s.
- [52] TICHÁ, Š.; ADAMEC, J. Návod do cvičení z předmětu Strojírenská metrologie. Ostrava: VŠB-Technická univerzita Ostrava, 2008. 92 s.
- [53] BRYCHTA, J.; ČEP, R.; NOVÁKOVÁ, J.; PETŘKOVSKÁ, L. Technologie II 1. díl. Ostrava: Ediční středisko VŠB-Technická univerzita Ostrava, 2007, s. 126. ISBN 978–80–248–1641–8.
- [54] Sa (Arithmetical Mean Height) | Area Roughness Parameters | Introduction To Roughness | KEYENCE America. Sensors and Machine Vision Systems for Factory Automation/KEYENCE.America[online]. Dostupné z: <https://www.keyence.com/ss/products/microscope/roughness/surface/parameters.jsp>
- [55] ČSN EN ISO 4287 : Geometrické požadavky na výrobky. Praha: Český normalizační institut, 1999. 24 s
- [56] BRYCHTA, J.; ČEP, R.; NOVÁKOVÁ, J.; PETŘKOVSKÁ, L. Technologie II 1. díl. Ostrava: Ediční středisko VŠB-Technická univerzita Ostrava, 2007, s. 126. ISBN 978–80–248–1641–8.
- [57] DORAZIL, P. Studium přípravy povrchu substrátu na vlastnosti nátěrového systému. Ostrava, 2009. Diplomová práce. VŠB – TU Ostrava, Fakulta strojní.
- [58] VAČKÁŘ, J.; PERNÍKÁŘ, J.; BUMBÁLEK, L. Jakost a strojírenská metrologie: Návod do cvičení. Brno: VUT Brno, 1993. 95 s
- [59] LIPTÁK, O. Technológia výroby: obrábanie. Bratislava: ALFA, 1979. 444 s

- [60] TICHÁ, Š.; ADAMEC, J. Návod do cvičení z předmětu Strojírenská metrologie. Ostrava: VŠB-Technická univerzita Ostrava, 2008. 92 s
- [61] ОПТИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ ИЗМЕРЕНИЙ. Познайка.Орг - Сайт знаний [online]. Dostupné z: <https://poznayka.org/s85355t1.html>
- [62] DRÁBEK, M. Měření drsnosti řezných hran při laserovém dělení kovů. Bakalářská práce. VÚT Brno, 2012, 30-32 s
- [63] Roughness Measurement of Sliding Metal Surfaces using the Olympus OLS4100 Laser Confocal Microscope [online]. [cit. 2017-05-07]. Dostupné z: <http://www.olympus-ims.com/en/applications/roughness-measurement-of-sliding-metal-surfaces-using-ols>
- [64] Alicona: Focus variation [online]. Alicona, 2017, 2017(English edition 7) [cit. 2019-04-15]. Dostupné z: http://www.lncorp.com/wpcontent/uploads/2017/11/Alicona_FOCUSvariation_magazine_2017_EN.pdf
- [65] KREJSEK J. Vliv řezné rychlosti na přesnost a drsnost obrobeného povrchu technologií víceosého frézování. Ostrava, 2019. Diplomová práce. VŠB – TU Ostrava, Fakulta strojí. Dostupné z: https://dspace.vsb.cz/bitstream/handle/10084/137131/KRE0248_FS_N2301_2303T002_2019.pdf?sequence=1&isAllowed=y s. 40
- [66] Přenosný drsnoměr Mitutoyo SJ-210 | Gamin. Gamin | Gamin [online]. Copyright © 2020 Omega Design, s.r.o. [cit. 16.05.2020]. Dostupné z: <https://www.gamin.cz/mitutoyo-sj-210/>
- [67] Renishaw Additi ve Manufacturing: obrácený proces oproti třískovému obrábění | Technický týdeník. TT | Technický týdeník [online]. Copyright © Business Media CZ Nádražní 32, 150 [cit. 15.05.2020]. Dostupné z: https://www.technickytydenik.cz/rubriky/archiv/renishaw-additi-ve-manufacturing-obraceny-proces-oproti-triskovemu-obrabeni_20072.html
- [68] AM400 | Tech-Labs. Tech-Labs | Training Systems for Industry and Education [online]. Dostupné z: <https://tech-labs.com/products/am400>
- [69] AM 400. Object moved [online]. Copyright © [cit. 16.05.2020]. Dostupné z: <https://www.renishaw.cz/cs/am-400--35456>
- [70] 3D tisk kovů. Object moved [online]. Copyright © [cit. 16.05.2020]. Dostupné z: <https://www.renishaw.cz/cs/3d-tisk-kovu--32084>
- [71] A. Townsend, N. Senin, L. Blunt, R. K. Leach, J.S. Taylor Surface texture metrology for metal additive manufacturing: a review Precis. Eng., 46 (2016), pp. 34-47, 10.1016/j.precisioneng.2016.06.001